GEORGE BREUER

EL AIRE EN PELIGRO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

GEORGE BREUER

EL AIRE EN PELIGRO

SALVAT

Versión española de la obra original alemana
Geht uns die luft aus? de George Breuer

Traducción: Joaquín Catalá de Alemany

Edición digital Sargont (2018)

© 1987 Salvat Editores, S.A. — Barcelona
© 1983 Editorial Alhambra, S.A.
© 1978 Deutsche Verlags-Ánstalt GmbH, Stuttgart
ISBN: 84-345-8246-5 Obra completa
ISBN: 84-345-8416-6
Depósito legal NA-289-1987 ,
Publicada por Salvat Editores, S.A. — Mallorca, 41-49 — Barcelona
Impresa por Gráficas Estella. Estella (Navarra)
Printed in Spain

PROLOGO A LA EDICIÓN ESPAÑOLA

Esta edición está destinada a los lectores de lengua española y es una versión, puesta al día, de la edición de lengua inglesa que fue publicada, en 1980, por Cambridge University Press bajo el título: Air in Danger: Ecological Perspectives of the Atmosphere. *Espero que contribuirá a que tanto los lectores españoles como los hispanoamericanos logren obtener una mejor comprensión de estos problemas, que son cruciales, lo mismo para los países industrializados que para los que se encuentran en vías de desarrollo.*

Viena, septiembre de 1982.

GEORG BREUER.

INDICE GENERAL

Introducción. ¿Está amenazada nuestra atmósfera?

1. Oxígeno y dióxido de carbono: ¿en qué consiste el riesgo?
¿Son los bosques productores de oxígeno? – La destrucción forestal y el aumento del dióxido de carbono – La erosión y la pérdida de oxígeno – ¿Son las algas productoras de oxígeno? – ¿Está en peligro el oxígeno atmosférico?

2. La historia de la atmósfera
Dimensiones generales – Lo que puede revelarnos la atmósfera acerca del origen de la tierra – Los antecesores de nuestra atmósfera – «Aire» desprovisto de oxígeno – Las «divisas» componentes de la radiación y los «derechos aduaneros» de la atmósfera – ¿Vida por azar? – Del alimento fósil a la fotosíntesis – ¿Cuál es la edad de la vida? – Trabajo en equipo – Formaciones de hierro en bandas – Un medio ambiente nuevo – El origen de los ciclos biológicos – ¿Está equilibrado el ciclo a largo plazo?

3. El aumento del dióxido de carbono. ¿Cuál puede ser la importancia de tal riesgo?
El dióxido de carbono atmosférico y el consumo combustible – 80 toneladas de carbono marcado – ¿Está aumentando o disminuyendo la biomasa mundial? – ¿Qué es lo que podemos conocer a partir de los anillos arbóreos? – La búsqueda de la sima que falta – Predicciones con muchas incógnitas – El clima, en peligro

4. Nitrógeno y ozono: insospechadas relaciones mutuas
El origen de organismos capaces de autosubsistencia a base de nitrógeno – ¿Un antepasado común o transferencia genética natural? – El ciclo del nitrógeno – Fertilización nitrogenante, intencionada o no – Casi un gas noble – Frascos atomizadores (sprays), fertilizantes y aviación supersónica – Consecuencias de la destrucción del ozono

5. Un difícil dilema
Si los microorganismos fueran seres humanos... – Después de la próxima era glacial – ¿Una tercera alternativa? – ¿Se exagera en demasía la cuestión del dióxido de carbono? – ¿Vamos a continuar con lo de «un caballo y un conejo»? – Una estrategia para ganar tiempo – La

repoblación forestal: una política que reportaría muchos beneficios – ¿Después de nosotros el diluvio?

Glosario de términos técnicos

INTRODUCCION

¿Está amenazada la atmósfera?

El aire que respiramos es un producto resultante de la propia vida terrestre más bien que una condición previa para que tal vida sea posible; en cuanto a su composición actual hay que destacar que se ha originado en virtud de procesos metabólicos de los organismos vivos y no como mera consecuencia de la historia cosmológica o geológica. Así pues, nuestra existencia está ligada a un ambiente muy peculiar y que resulta ser único en todo el sistema solar.

Los componentes principales de la atmósfera son el nitrógeno (78 por 100 en volumen), oxígeno (21 por 100) y el gas noble argón (ligeramente inferior al 1 por 100); además, existen alrededor del 0,33 por 100 de dióxido de carbono (CO_2), vestigios —es decir, cantidades inferiores a una milésima parte por ciento— de otros gases tales como metano, hidrógeno, óxidos de nitrógeno y algunos gases nobles, así como cantidades variables de vapor de agua, aunque a este último se le considera más bien como un agregado que como componente real[1] (véase la tabla 1).

Aparte del vapor de agua, que determina la humedad variable, la composición del aire es notablemente constante; hasta unos 100 kilómetros de altura, en el seno de la atmósfera, los porcentajes de sus componentes principales no experimentan ninguna variación ni con la latitud geográfica, ni con la estación del año; tan sólo el dióxido de carbono es el que, además de las variaciones motivadas por las actividades humanas, manifiesta otras diurnas y estacionales ligadas a la propia vegetación.

La estabilidad puesta de manifiesto por la composición de la atmósfera es tanto más notable al tener en cuenta que, en sentido químico, nuestra atmósfera no resulta ser evidentemente estable; según los científicos, más bien se trata de una peculiar mezcla gaseosa que, mientras contenga vapor de agua, no se encuentra en equilibrio termodinámico. El oxígeno, al oxidar a los minerales contenidos en la corteza terrestre, y en particular al

[1] En las capas atmosféricas próximas al suelo el contenido de vapor de agua varía en el 0 y el 2 por 100; en la estratosfera existen sólo vestigios de vapor de agua (algunas diezmillonésimas por ciento).

hierro, el carbono y el azufre, se agotaría en el transcurso de algunos millones de años, si no fuera continuamente repuesto en la atmósfera por las plantas verdes. Si, por otra parte, partimos del hecho de la existencia del oxígeno, resulta muy probable que se registraran reacciones químicas con el nitrógeno atmosférico, a tal punto que, a través de ellas, todas las aguas existentes sobre la superficie terrestre se convertirían gradualmente en soluciones de nitratos; esto no ocurre gracias a que existen ciertas bacterias que descomponen los nitratos y reciclan el nitrógeno, reintegrándolo a la atmósfera.

TABLA 1
Composición de la atmósfera terrestre

Gas	*Volumen* %	*Masa* %	*Masa* (miles de millones de toneladas)
Nitrógeno (N_2)	79,08	75,51	3.865.000
Oxígeno (O_2)	20,95	21,15	1.184.000
Argón (A)	0,93	1,28	65.000
Dióxido de carbono * (CO_2)	0,03	0,046	2.350
($C0_2$ = 1975) *	0,0326	0,051	2.600
Trazas de	*Volumen* (millonésimas)	*Masa* (millonésimas)	*Masa* (miles de millones de toneladas)
Neón (Ne)	18	12,5	64
Helio (He)	5,2	0,72	3,7
Metano (CH_4)	1,5	0,94	4,3
Criptón (Kr)	1,0	2,9	15
Gas hilarante (N_20) **	0,5	0,8	4
Hidrógeno (H_2)	0,5	0,035	0,18
Ozono (O_3)	0,4	0,7	3,3
Xenón (Xe)	0,08	0,36	1,8
Además, cantidades variables de vapor de agua (hasta el 2%).			

* Con variaciones estacionales de unos pocos tantos por ciento.

** De acuerdo con medidas recientes (pág. 111), el contenido de gas hilarante en la atmósfera viene a ser de 0,25 a 0,3 millonésimas en volumen, lo que corresponde a una masa total de 1 500 a 2.000 millones de toneladas.

[De G. E. HUTCHINSON, en G. P. KUIPER (ed.), *The Earth as a Planet*, Chicago, 1954, pág. 389.]

Los componentes de la atmósfera se encuentran permanentemente implicados en un gran número de procesos geológicos y biológicos, y son devueltos a la atmósfera a través de complejos ciclos, en los que los propios seres vivos desempeñan un importante papel. Así pues, la composición de la atmósfera tan sólo puede mantenerse constante en el caso de que tales ciclos, con sus distintas escalas de tiempo, puedan mantenerse en un estado de equilibrio. Resulta evidente que un sistema tan complicado y que tan sólo posee una capacidad limitada de autorregulación, puede resultar vulnerable frente a ciertas perturbaciones naturales o de origen antropogénico que puedan producirse.

Este libro describe la forma en que nuestra atmósfera, y los procesos reguladores de su composición, han venido evolucionando a través de miles de millones de años, y de qué manera el hombre ha venido interfiriendo en tales procesos; al mismo tiempo, se analiza cómo y hasta qué punto puede ser perturbado el equilibrio natural en virtud de la interferencia humana, y cuáles pudieran ser las consecuencias para la vida sobre la superficie de la Tierra.

La preocupación sentida por el autor acerca del oxígeno atmosférico fue la que motivó inicialmente la determinación de abordar tan complejo problema; durante los últimos años, diversos y distinguidos hombres de ciencia han señalado reiteradamente que el consumo global de oxígeno, a través de diversos procesos tecnológicos, está creciendo a un ritmo alarmante, a la vez que los más importantes productores de oxígeno, bosques y algas marinas, van siendo destruidos por la deforestación y la contaminación de los océanos, también a un ritmo no menos impresionante.

Ambas tendencias opuestas inducen a que uno piense que, a largo plazo, pueden traer consigo el desastre; sin embargo, un estudio completo de todos los datos científicos disponibles conduce a una sorprendente información, al menos por el momento: Contrariamente a lo que cabría esperar, no hay ninguna razón que justifique tal temor, pues el oxígeno es uno de los recursos naturales que podemos considerar prácticamente inagotable, por lo menos en lo que respecta a escalas de tiempo de siglos o milenios. La masa total del oxígeno atmosférico, unos 1.200 billones de toneladas (es decir 1.200 millones de millones), es tan enorme que en los intervalos de tiempo citados ninguna actividad humana, cualquiera que sea, puede determinar un cambio notable. No obstante, esto no debe considerarse como una razón que justifique que nos despreocupemos del

asunto, ya que las citadas tendencias no afectan tan sólo al oxígeno, sino también al dióxido de carbono, del que existen unos 2,6 billones de toneladas en la atmósfera. El mismo efecto que determina únicamente una ligera disminución del oxígeno, inapreciable con las técnicas analíticas actuales, produce, en cambio, un apreciable aumento en la reserva del dióxido de carbono, que es considerablemente menor. Entre los años 1957 y 1977, el dióxido de carbono en la atmósfera aumentó en un 5 por 100, y para los próximos cincuenta o setenta años, se considera posible que tal incremento resulte ser del doble, o incluso del triple. La mayor parte de los expertos en Climatología consideran que, como consecuencia de ello, se producirá un calentamiento global y, por tanto, un desplazamiento de las zonas climáticas y las áreas de precipitación. Todo ello podría obligar a realizar procesos de adaptación difíciles y costosos y que posiblemente determinarían desastrosos impactos sobre las condiciones agrícolas en muchas zonas del Tercer Mundo.

Ciertamente resulta indispensable hacer frente a agudos problemas relativos a la polución del aire por gases nocivos, polvo y radiactividad, aunque tales problemas no constituyen el objetivo de este libro; sin embargo, al tratar de ellos no cabe olvidar el aumento global del dióxido de carbono, ya que, a largo plazo, podría constituir un problema de importancia todavía mayor. Una vez que un problema toma carácter acuciante, resulta ya demasiado tarde para tratar de resolverlo, debido a que las variaciones en la estructura de los métodos de obtención y utilización de la energía, que son probablemente las fuentes más importantes del dióxido de carbono, requieren varias décadas para su implantación. Ante tal dilema no parecen existir soluciones sencillas a la vista; ahora bien, ante el hecho de que la población mundial se está duplicando cada treinta años, y las tremendas cantidades de energía que son necesarias para tratar de elevar el nivel de vida de los países en vías de desarrollo, resulta imposible este masivo y cada día globalmente creciente consumo energético, en forma de carbón, petróleo y gas natural; es, pues de la máxima urgencia que tanto los especialistas como el público en general tomen conciencia de la gravedad del problema: hay que encontrar métodos para la producción de energía que no den lugar ni a un incremento de los niveles atmosféricos del dióxido de carbono, ni a más carga de radiación sobre nuestro medio ambiente.

También el ciclo del nitrógeno, aunque menos estudiado que el del oxígeno, constituye objeto de seria preocupación. La cantidad total de nitrógeno fijado que el hombre está agregando a los suelos de manera deliberada como fertilizante y no intencionalmente como productos de combustión y escapes industriales, llega a ser del orden del 20 al 30 por 100 de la cantidad total de nitrógeno fijado naturalmente, según las estimaciones más cautelosas. La producción de fertilizantes va tal vez a triplicarse hacia el año 2000, y la «fertilización no intencionada», mediante los productos de combustión, también está aumentando rápidamente; nadie es capaz de predecir con cierto grado de certeza cuáles pueden ser las consecuencias de esta creciente adición de compuestos nitrogenados a los suelos; en caso de que no se descompongan es probable que produzcan un aumento de los productos nitrogenados tóxicos en las aguas subterráneas; en caso de que sean descompuestos bajo la acción de microorganismos resultarían vertidas en el seno de la atmósfera grandes cantidades de óxido nitroso (gas hilarante), que es uno de los productos originados en tales procesos; este incremento de óxido nitroso en la atmósfera, y su paso posterior a la estratosfera, determinaría una reducción de la concentración del ozono atmosférico, que es el gas que nos protege y defiende de la peligrosa radiación solar ultravioleta, y que, por cierto, ya está siendo afectado por nuestra civilización industrial.

Muchos de los temas tratados en este libro contienen descubrimientos científicos que fueron obtenidos tan sólo en los pocos años últimos; la mayor parte no resultan del todo claros, son controvertibles o comprendidos únicamente en sus líneas generales. Como dicen los geoquímicos americanos R. M. GARRELS y A. LERMAN, en un trabajo que presentaron en la Conferencia de Dahlem sobre «Ciclos químicos globales y sus alteraciones por el hombre»[2], «Preguntar qué tipo de información resulta de mayor utilidad... equivale a preguntar a una persona que se está muriendo de hambre la relación de los platos que desearía tener a su disposición; de hecho, cualquier nuevo dato acerca de la Tierra será bien recibido.»

En este campo de investigación existen apenas datos que sean conocidos con el mismo grado de precisión o certeza como, por ejemplo, sabemos la distancia media desde la Tierra al Sol, o el peso atómico del hidrógeno;

---

[2] R. M. GARRELS y A. LERMAN en: W. STUMM (ed.), *Global Chemical Cycles and their Alterations by Man*, Dahlem Conference, Berlín, 1977, pág. 30.

en muchos casos hay que partir de burdas estimaciones, y las opiniones de distintos especialistas a menudo difieren notablemente entre sí. Cuando el bioquímico americano CONRAD C. DELWICHE[3], en 1970, publicó los resultados de sus primeros cálculos para el balance del ciclo del nitrógeno, comentaba que admitía como posibles errores cifras tan grandes como las que corresponden a un factor 10. Esto equivale a decir que los valores correctos pudieran muy bien ser diez veces mayores, o menores, que los mencionados en su trabajo. En los diez años transcurridos desde entonces, el mismo autor y otros científicos consiguieron reducir ligeramente tal intervalo de incertidumbre. No obstante, cuando el autor tuvo la posibilidad de discutir personalmente la cuestión, durante la citada Conferencia de Dahlem, DELWICHE le dijo: «Encontrará usted las cifras relativas al balance del nitrógeno en la información contenida en la carpeta de la Conferencia. *No haga caso de ellas»)* tal advertencia se refería no tan sólo a *sus propias cifras,* sino también a las que daban otros de sus colegas.

No es preciso decir que tanto las teorías como las previsiones, basadas en datos tan inciertos, tan sólo pueden tener carácter de orientación. Como dicen los científicos americanos P. CLOUD y A. GIBOR, «El que esté dispuesto a afirmar cuáles puedan ser los efectos finales de tales procesos será más listo o valiente que nosotros; tal vez tales efectos puedan tener carácter autolimitativo o autocorrectivo, pero la experiencia debería advertirnos que no hay que arriesgarse en ningún caso... Si queremos asegurarnos de que la biosfera va a seguir existiendo a largo plazo, cada nueva acción debe ir acompañada de un esfuerzo que nos lleve a comprender sus consecuencias a través de todo el ecosistema global y nos permita determinar en qué forma pueden ser favorablemente manejadas o evitadas»[4].

Tal vez nuevas investigaciones logren demostrar, en el futuro, que algunas de las amenazas descritas en este libro no son tan graves como hoy día sospechamos, pero al mismo tiempo cabe también la posibilidad de que una u otra de las amenazas potenciales previstas resulte, a la larga, más seria de lo que hoy día nos tememos. El hombre, en principio, es capaz, en la actualidad, de perturbar gravemente muchos ciclos naturales; ésta es una realidad que no podemos eludir; parece inevitable que la extensión de tales

---

[3] C. C. DELWICHE, *Scientific American,* septiembre, 1970, página 137.

[4] P. CLOUD y A. GIBOR, *Scientific American,* septiembre, 1970, página 111.

perturbaciones potenciales siga creciendo con el aumento de la población mundial y el ritmo al que va ampliándose la industrialización. No es posible dejar, simplemente, que cada cosa siga su propia marcha, hasta que llegue el día en que los hombres de ciencia sean capaces de predecir, con mayor seguridad, las posibles consecuencias de nuestras actividades. Donde y cuando surjan dudas es preciso tomar precauciones, pues, de lo contrario, se corre el riesgo de «sobrecargar» nuestro ambiente y producir daños que pudieran tener carácter irreversible.

Los temas tratados en este libro fueron ampliamente discutidos durante la Conferencia de Dahlem, que se celebró en Berlín, en noviembre de 1976; a lo largo de cinco días, geólogos, meteorólogos, oceanógrafos, químicos, ecólogos, físicos nucleares, conjuntamente con expertos en economía política y sociólogos, procedentes de nueve países distintos, trataron de llegar a definir los problemas, propusieron cuestiones específicas que requerían una mayor investigación y llegaron a elaborar unas recomendaciones preliminares sobre la base de los conocimientos de que se disponía por el momento. El autor agradece al comité organizador de dicha conferencia, y en particular a su presidente, el Dr. SILKE BERNHARD, la oportunidad de participar en ella como observador y poder discutir diversas cuestiones con los participantes.

Las discusiones iniciadas durante la Conferencia de Dahlem fueron posteriormente continuadas en el transcurso de otras reuniones internacionales e interdisciplinares; una de ellas fue la Reunión de trabajo sobre dióxido de carbono, clima y sociedad[5] que se celebró en febrero de 1978, en Badén, Austria, organizada por el Instituto Internacional para Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA). El autor desea expresar su gratitud a la IIASA, y en particular al director de su proyecto energético, profesor WOLF HAFELE, por haber sido invitado a dicha reunión de trabajo.

Tuve, además, la oportunidad de asistir a una reunión de trabajo sobre el tema «Interacciones entre Energía y Clima» que se celebró en la Universidad de Münster, Alemania Federal, en marzo de 1980[6], gracias a la amabilidad de W. BACH. Por último, también hemos de mencionar dos

---

[5] J. WILLIAMS (ed.), Carbón Dioxide, Climate and Society, proceedings of an IIASA workshop, Pergamon Press, Oxford, 1978.

[6] Proceedings Editors W. BACH, J. PANKRATH, J. WILLIAMS, D. REIDEL, Dorchet, Boston, Londres, 1980.

nuevas Conferencias de Dahlem, a las que pude acudir y en las que se volvieron a considerar ciertos problemas de los que nos ocupamos en este libro; una de ellas se desarrolló en septiembre de 1980 acerca del tema «Depósitos minerales y la Evolución de la Biosfera»[7]; la otra se celebró en mayo de 1982, y estuvo dedicada al tema de «Química Atmosférica»[8]. Con todo ello llegué a obtener nuevas perspectivas acerca del tema de que nos ocupamos en este libro, pues gracias a mi participación en todas estas reuniones conseguí traerme nuevo y valioso material e ideas.

Agradezco al profesor E. BRODA, de la Universidad de Viena, profesor C. E. JUNGE, profesor M. SCHIDLOWSKI y Dr. J. HAHN, del Max-Planck Institut für Chemie, en Maguncia, profesor K. E. ZIMEN, del Hahn-Meitner Institut für Kernforschun, en Berlín, profesor H. FLOHN, de la Universidad de Bonn, profesor H. LIETH, de la Universidad de Osnabrück, Dr. H. D. FREYER, del Kernforschun- sanlage Jülich, Dr. U. HAMPICKE, de la Universidad de Essen, profesor B. BOLIN, de la Universidad de Estocolmo, profesor H. LEIBUNDGUT, del Federal Institute of Technology de Zürich (ETH), profesor W. S. BROECKER, del Lamont-Doherty Geological Observatory, profesor C. C. DELWICHE, de la Universidad de California, profesor R. M. GARRELS y profesor F. T. MACKENZIE, de la Northwestern University, profesor W. REINERS, del Darmouth College, profesor G. M. WOODWELL, del Marine Biological Center, en Woods Hole, y al profesor STEPHEN SCHNEIDER, del National Center for Atmospheric Research, en Boulder, por haber encontrado tiempo para contestar a mis preguntas y leer partes del borrador de este libro. Todos ellos me dieron valiosos consejos para la versión final y para poder mantener al día la versión inglesa de la obra. Tengo que dar también las gracias al Dr. B. LÖTSCH y maestro R. GÖLLER, del Ludwig-Boltzmann-Institut für Umweltwissenschatten und Naturschutz, de Viena, profesor E. F. BRÜNIG, de la Universidad de Hamburgo y Dr. E. T. ALEXANDERSSON, de la Universidad de Upsala, por haberme facilitado instructivas fuentes de material original.

En cuanto al contenido del libro, y en especial con relación a las conclusiones resumidas en el último capítulo, son de mi exclusiva responsabilidad.

---

[7] H. D. HOLLAND, M. SCHIDLOWSKI, Eds., Springer, Berlín, Heidelberg, Nueva York, 1982.

[8] E. D. GOLDERG, Ed. Springer (en prensa).

Viena, noviembre de 1979.

GEORG BREUER.

CAPITULO 1

Oxígeno y dióxido de carbono: ¿en qué consiste el riesgo?

1.1. ¿SON LOS BOSQUES PRODUCTORES DE OXIGENO?

Un árbol plenamente desarrollado posee, como puede leerse en cualquier trabajo sobre fotosíntesis, un tremendo poder para la producción de oxígeno; cuando llega a tener unos ciento quince años de vida, un árbol del tipo del haya, expone unas doscientas mil hojas, con una superficie total de 1 200 metros cuadrados; durante el transcurso de un día soleado, tal árbol inhala 9 400 litros de dióxido de carbono, para producir 12 kilogramos de hidratos de carbono, con liberación de otros 9 400 litros de oxígeno; a través de este mecanismo, unos 45 000 litros de aire son regenerados, lo que viene a ser suficiente para la respiración de dos o tres personas.[9]

Pueden encontrarse datos análogos en muchos otros trabajos sobre fotosíntesis, y no cabe la menor duda de que tales números resultan científicamente correctos. De ellos, un lector que no esté familiarizado con el tema, llegará seguramente a la conclusión de que una simple acumulación de hayas produciría un exceso o «excedente» de oxígeno, cuando, en realidad, esto no es cierto, ya que la fotosíntesis es tan sólo una parte de un ciclo natural cerrado, en el que la respiración desempeña el papel inverso.

A través de la fotosíntesis, las plantas verdes producen hidratos de carbono a partir del dióxido de carbono y el agua; en este proceso es captada la energía solar y almacenada en forma de materia orgánica, mientras que el producto de «desecho», que es el oxígeno, resulta desprendido en el seno de la atmósfera. En la respiración, la energía previamente almacenada es consumida: los hidratos de carbono son «quemados», consumiendo oxígeno, para dar lugar a dióxido de carbono y agua, en un proceso análogo al que se desarrolla en una estufa cuando se quema carbón para aprovechar su energía almacenada.

---

[9] P. BOGER, *Naturw. Rdsch.*, *28*, 429, 1975.

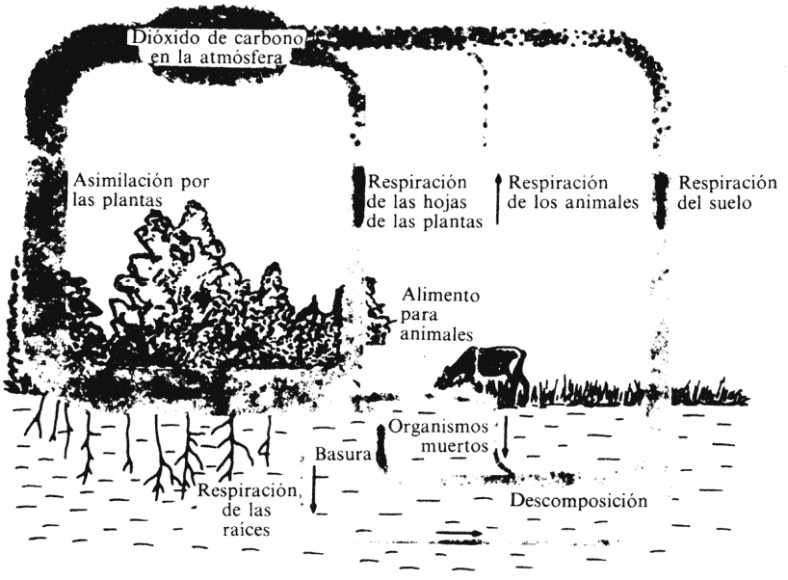


FIG. 1. Representación esquemática del ciclo atmosférico-biosférico del carbono; las anchuras de los canales son aproximadamente proporcionales a las cantidades o flujos que intervienen. En latitudes medias y altas la respiración del suelo, es decir, la suma de la correspondiente a la respiración de raíces de las plantas, de microorganismos y pequeños animales del suelo, puede llegar a ser casi del 70 por 100, respecto al total del flujo debido a respiración; la de las hojas de las plantas alcanza alrededor del 24 por 100, mientras que la de los animales (incluyendo al hombre) alcanza el 5 por 100. En los trópicos, la fracción de respiración del suelo es menor, ya que allí la capa de humus es, en general, más delgada, puesto que la materia orgánica se descompone más rápidamente, sobre todo en la parte superior de los suelos. (De B. BOLIN, *Scientific American*, septiembre de 1970, pág. 126.)

Nuestra haya requiere alrededor de la mitad de los hidratos de carbono que produce, para hacer frente a sus propias necesidades energéticas; por medio del proceso de respiración de sus hojas y raíces, consume la mitad del oxígeno que liberó o, para ser más precisos, consume una cantidad de oxígeno equivalente a la mitad de la cantidad que produjo; alrededor de otra cuarta parte es consumida por los animales que respiran y que se alimentan de los productos de corta vida originados en el haya: orugas y escarabajos que comen parte de las hojas, animales del suelo y microorga-

nismos que viven entre el follaje caído en otoño al suelo, mientras las ardillas y jabalíes se comen las simientes, etc. La restante cuarta parte del oxígeno liberado por nuestra haya es consumida cuando su madera, o en algún caso el papel que con ella se obtuvo, se quema, y cuando su tocón, raíces y ramas se desintegran, es decir, resultan descompuestos por la acción de pequeños animales y microorganismos que consumen oxígeno.

Desde luego, las cantidades relativas que intervienen en el balance global son variables, sin embargo, cualesquiera que puedan ser tales cantidades relativas, al final se restablece el balance o equilibrio entre todas ellas. *Cuando la sustancia orgánica total producida por el haya durante su ciclo vital se ha descompuesto, la cantidad total de oxígeno consumida es equivalente a la que liberó el árbol cuando estaba vivo.*

Si nuestro árbol crece al borde de una zona pantanosa, sus hojas, ramas y finalmente todo el tronco, en ausencia de oxígeno, por último, pueden terminar hundiéndose en el terreno pantanoso y carbonizarse; bajo tales circunstancias habrá un excedente de oxígeno producido por tal árbol que permanece en la atmósfera hasta que el carbón, por procesos de erosión o minería vuelva a la superficie y pueda ser oxidado; tal proceso requiere miles e incluso millones de años, de modo que, en este caso, el ciclo natural se cierra con un prolongado retraso, mediante procesos que son más bien de tipo geológico que biológico.

Dicho llanamente, nosotros, los seres humanos, respiramos un oxígeno que fue producido por las cosechas a base de las que vivimos o nutrimos a nuestros animales, cuyos productos consumimos después. Desde luego, no podemos tomar esto literalmente, ya que la pista de las moléculas de oxígeno que respiramos no puede ser seguida hacia atrás, precisamente hasta las moléculas de los hidratos de carbono cuya formación las liberó; sin embargo, cuantitativamente, existe una concordancia: mientras respiramos consumimos tanto oxígeno como nos es necesario para «quemar» los alimentos que ingerimos. Por otra parte, la cantidad de materia orgánica (hidratos de carbono) disponible para sufrir oxidación, no puede superar a la que previamente fue producida por las plantas verdes. En el entorno biológico actual, la producción y el consumo de oxígeno y dióxido de carbono están fundamentalmente en equilibrio.

No obstante, el ritmo a que se sucede la destrucción de la materia orgánica difiere de acuerdo con el camino seguido por el proceso de oxidación; mientras el carbono fijado a través de la fotosíntesis permanece en la

materia orgánica, el oxígeno liberado reside en la atmósfera. El hecho de que exista carbono fijado biológicamente, pero que todavía no ha sido oxidado de nuevo, es la razón que justifica la presencia de oxígeno en nuestra atmósfera; en este sentido es en el que los científicos se refieren a distintos depósitos o reservas de carbono, con diversos tiempos de residencia (o período de tiempo transcurrido antes de que el carbono sea de nuevo oxidado).

Del primer depósito o reserva toman las propias plantas los hidratos de carbono que necesitan para hacer frente a sus mismos requisitos energéticos; en tal caso, el tiempo de residencia varía entre fracciones de segundo y un día, puesto que las plantas también respiran durante la noche cuando, por falta de luz solar, no puede producirse la fotosíntesis; la variación diaria que tiene lugar en tal «reserva» puede ser fácilmente investigada midiendo la composición del aire en una zona forestal; tan pronto como sale el sol y se inicia la fotosíntesis, se observa una disminución en la concentración del dióxido de carbono. En los últimos años de la década de los sesenta, cuando la abundancia media del dióxido de carbono era de 320 partes por millón (1 ppm significa una molécula de dióxido de carbono por cada millón de moléculas de aire), ó 0,032 por 100, durante las primeras horas de la tarde de un día soleado se medían, junto a las copas de los árboles de un bosque, 305 ppm de dióxido de carbono; sin embargo, en noches tranquilas y estables, la medida era de 400 ppm junto al suelo del bosque, donde los procesos de descomposición prosiguen noche y día[10].

Un aumento tan considerable en el contenido de dióxido de carbono debe ir acompañado de una disminución paralela del oxígeno, y viceversa; sin embargo, estas variaciones locales de oxígeno son tan pequeñas, frente a las enormes cantidades de oxígeno presentes en la atmósfera, que escapan a las posibilidades de detección de los equipos de medida de que se dispone en la actualidad.

En la segunda reserva o depósito el tiempo de residencia del carbono es del orden de semanas a años; aquí encontramos los productos biológicos de vida corta (con tal que no contribuyan a la formación de humus): cosechas, hierba, flores, follaje, agujas de los árboles y todas aquellas partes en las que las plantas almacenan sustancias energéticas para su descendencia o para el siguiente período de crecimiento, frutos, semillas, bulbos, etc. La

[10] B. BOLÍN, *Scientific American*, septiembre, 1970, pág. 125.

mayor parte de los animales pueden también quedar incluidos en este «depósito», aunque la masa total de todos los animales que viven sobre la Tierra representa tan sólo una milésima parte de la correspondiente a la propia vegetación terrestre.

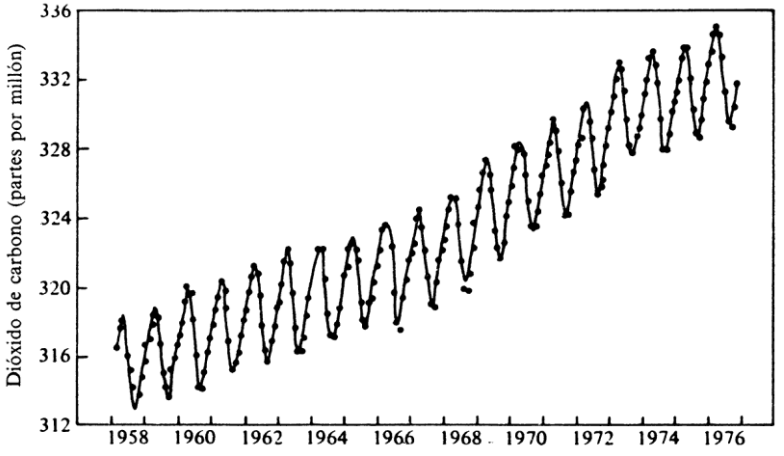


FIG. 2. Variaciones de la concentración del dióxido de carbono atmosférico, según medidas realizadas por C. D. KELLING y cois, en el Observatorio de Mauna Loa, Hawái. Las oscilaciones de tipo estacional son producidas por los correspondientes cambios estacionales de la vegetación en el hemisferio norte. Los puntos indican medias mensuales. (Gráfica tomada de G. M. WOODWELL, *Scientific American,* enero de 1978, pág. 37.)

En latitudes moderadas y altas el contenido de este segundo depósito está sujeto a notables variaciones estacionales; esto queda claramente de manifiesto por las medidas llevadas a cabo por científicos americanos, desde 1957, en el Observatorio de Mauna Loa, Hawai, de las concentraciones del dióxido de carbono atmosférico; tales datos muestran un aumento gradual del contenido medio del dióxido de carbono, a lo largo de los años, al que se superpone una clara variación ondulatoria anual. Una tendencia similar fue encontrada, asimismo, por meteorólogos suecos que

han estado midiendo concentraciones de dióxido de carbono, a bordo de un avión y en forma regular, desde 1963 [11].

De acuerdo con estimaciones del meteorólogo sueco BERT BOLIN, la atmósfera, al norte de los 30° de latitud norte, pierde casi el 3 por 100 de su contenido en dióxido de carbono, durante los meses de verano, desde abril a septiembre; esto corresponde a unos 4 000 millones de toneladas de carbono. En el aire próximo a la superficie, sobre los continentes del hemisferio norte, la razón de mezcla media del dióxido de carbono varió a mediados de la década de los años sesenta, desde más de 330 ppm, en abril, a menos de 310 ppm, durante septiembre. Estas variaciones no quedan limitadas a las regiones forestales, ya que los vientos producen una mezcla efectiva que influye globalmente en todo el hemisferio norte. En Hawái, lejos de todos los continentes, y en latitudes tropicales, la variación media que se registra entre los valores primaverales y los del otoño aún llega a ser de 5 ppm; en el hemisferio sur, en el que las tierras ocupan tan sólo una pequeña parte, y en latitudes medias, las variaciones anuales son menos acusadas, pero, a pesar de todo, son perfectamente identificables incluso en el polo sur.

El tercer «depósito» contiene la madera de los árboles vivos, y humus, restos de plantas que están siendo descompuestos por un amplio número de microorganismos, hongos, gusanos, polillas, insectos, así como otras minúsculas criaturas. Algunas especies de animales de vida larga y la raza humana (o, mejor dicho, el carbono contenido en ellos) pueden ser también incluidos en este tercer nivel de almacenamiento, que viene a contener más del 90 por 100 de la sustancia viva y casi toda la materia en descomposición, sobre la Tierra. Este carbono está fijado durante decenas o centenas y a veces hasta miles de años; representa, por lo menos, una cantidad igual al doble o triple del carbono almacenado en el dióxido de carbono atmosférico (Fig. 5).

Con gran diferencia, el mayor «depósito» es el cuarto, que contiene los restos de todos los animales y plantas que fueron sepultados en sedimentación (depósitos arcillosos o arenosos) y se integran para formar parte en

[11] Véase, por ejemplo, C. A. EKDAHL y C. D. KEELING, en: G. M. WOODWELL y E. V. PECAN (eds.), *Carbón and the Biosphere,* USAEC conference-720510 (24th Brookhaven symposium in biology), Sprin- gfield, Va., 1973; véase también BOLÍN.

ciclos geológicos a largo plazo. Los sedimentos van solidificándose gradualmente para formar rocas que, a su vez, intervienen en la formación de montañas o resultan sepultadas en el fondo de los océanos. En el primer caso, como las montañas gradualmente vienen afectadas por la erosión del tiempo, el carbono contenido en las rocas queda expuesto a la acción de la atmósfera, y de esta forma se oxida; en el segundo caso, los sedimentos van penetrando hacia capas más profundas, donde pueden experimentar fusión y otros procesos químicos; también en este caso el carbono, por lo general, resulta oxidado y, ocasionalmente, puede volver a la atmósfera en forma de dióxido de carbono volcánico.

En este depósito, el carbono, por lo general, se mantiene durante varias centenas de millones de años; la masa total del carbono almacenado en este cuarto depósito viene a ser de una milésima parte de la masa total del carbono existente en todos los organismos vivos o en descomposición, sobre los continentes y en los océanos; en gran parte se encuentra disperso por los sedimentos oceánicos; tan sólo una o dos milésimas partes constituyen depósitos de combustibles fósiles, aptos para ser recuperados por trabajos de minería. En los primitivos tiempos geológicos, cuando se formaron los grandes depósitos de carbón, a tal nivel de almacenamiento contribuyó también la tierra firme, pero en la actualidad, según los expertos, viene a ser casi exclusivamente obra de los océanos [12].

Desde luego, no se trata siempre exactamente del mismo carbono que se encuentra en sus respectivos depósitos; un bosque no contiene siempre los mismos árboles, pues los viejos caen y desaparecen por putrefacción, a la vez que surgen y crecen otros jóvenes, pero mientras la masa total de madera y humus varíe tan sólo muy ligeramente, como por lo general ocurre en la Naturaleza, la masa total del carbono fijado en los distintos «depósitos» se mantiene más o menos constante. Por tanto, permanece también en la atmósfera una cantidad constante y equivalente, que es liberada a través del proceso de formación de hidratos de carbono.

La composición de la atmósfera no depende del ritmo al que el carbono pasa a través de un «depósito»; el único dato importante es la masa total que ha sido fijada dentro del mismo. En una zona forestal con lluvia tropical, la producción y consumo de oxígeno y dióxido de carbono, por unidad

---

[12] Véase, por ejemplo, R. M. GARRELS, A. LERMAN y F. T. MACKENZIE, *American Scientist, 64*, 306, en particular, 308, 1976.

de superficie y año, viene a ser del doble de la que se observa en otra zona forestal mixta situada en latitudes medias; no obstante, la masa de carbono fijado en la madera y humus es prácticamente la misma en ambos casos, por unidad de superficie, de modo que las cantidades equivalentes de oxígeno que subsisten en la atmósfera son también casi iguales en ambos tipos de zona forestal.

Ni una zona forestal primitiva, ni otra cultivada en la que la limpieza viene equilibrada por una inmediata reforestación, pueden contribuir a restituir el oxígeno consumido, en alguna otra parte (procesos geológicos, industria, etc.); en este sentido cabe decir que las zonas forestales *no son* productoras de oxígeno. Tan sólo donde se logra un permanente aumento de la sustancia viva (la biomasa) y capa de humus, por ejemplo, mediante la plantación de árboles en zonas deforestadas, puede resultar alterada la composición de la atmósfera; es decir, será tomado más dióxido de carbono del aire del que resulta liberado por los procesos vitales. La cantidad de carbono en el tercer «depósito» aumenta; en consecuencia, a través de la fotosíntesis, se libera más oxígeno del que se consume en los procesos de respiración y desintegración, hasta que el nuevo desarrollo forestal alcanza su madurez y el ciclo queda equilibrado a un nuevo nivel.

Desgraciadamente, hoy día es más frecuente el proceso inverso, es decir, la destrucción de la zona forestal, y ello conduce a una disminución del oxígeno atmosférico y al correspondiente aumento de los niveles del dióxido de carbono; esto ocurre aun en el caso en que la zona forestal destruida pudo ser transformada con éxito en tierras de cultivo, puesto que los frutos de una granja son productos agrícolas de corta vida, de modo que entran en el segundo «depósito» o reserva de carbono, en lugar del tercero. La mayor parte de tales productos son consumidos dentro del año, lo que significa que son reconvertidos en dióxido de carbono y agua, consumiendo todo el oxígeno liberado durante su período de crecimiento. La cantidad de carbono fijado en las cosechas oscila entre 0,2 y 6,0 kilogramos por metro cuadrado de tierra cultivada, con un promedio de 0,5 kilos por metro cuadrado, aunque con grandes variaciones estacionales. La cantidad de carbono almacenado en la madera de los árboles vivos de un bosque viene a ser de diez a cien veces superior a esta última cifra y puede ser

incluso mayor [13]. Además, por conversión de una zona forestal en tierra de cultivo, e incluso en el caso peor en que se transforme en tierra erosionada o desierto, resulta destruida la capa de humus [14]; esta última destrucción no resulta ser parte de un ciclo biológico de corta duración, sino que conduce más bien a un simple consumo básico de oxígeno, con el correspondiente incremento del nivel alcanzado por el dióxido de carbono atmosférico.

1.2. LA DESTRUCCION FORESTAL Y EL AUMENTO DEL DIOXIDO DE CARBONO

Un tercio de la superficie total de la Tierra, lo que viene a representar una extensión de unos 50 millones de kilómetros cuadrados, está cubierta de bosques, o por lo menos así sucedía a mitad del presente siglo. ¿Cómo hubieran progresado, extendiéndose, las zonas forestales *sin* la intervención del hombre sobre la Naturaleza? ¿Hubieran llegado a ocupar la mitad de la extensión terrestre, o sus dos terceras partes, o tal vez todavía más?

Durante un intervalo de la Conferencia de Dahlem dirigí esta pregunta al profesor GEORGE M. WOODWELL, Director del Centro de Ecosistemas del Laboratorio de Biología Marina, de Woods Hole, Massachusetts, y ésta fue su respuesta: «Bien, las potenciales áreas forestales son bien conocidas; en una estimación aproximada yo diría que por lo menos abarca a la mitad de la extensión terrestre; casi toda Europa se encontraría cubierta de bosques, así como los países mediterráneos, la mayor parte del Oriente Medio, India, China, el este de los Estados Unidos, casi todo el Canadá y grandes partes de la América Latina. Pero existen partes de América, África y Asia que serían sabanas, tierras cubiertas de césped o desiertos, incluso sin que hubiera habido interferencia humana».

Desde luego ha habido cambios naturales en la vegetación desde el final de la última era glacial, hace de ello unos diez mil años. Los bosques se fueron extendiendo hacia el norte, y la tundra, retrocediendo hacia el

---

[13] De acuerdo con R. H. WHITTAKER, *Communities and Ecosystem*, Nueva York, 1970, pág. 83. Véase también la tabla 2 de este libro.

[14] La importancia del humus en relación al ciclo del dióxido de carbono se discute en el capítulo 3.

polo norte. Los climas en las zonas subtropicales se hicieron considerablemente más secos durante los cuatro mil años últimos. Por tanto, los cinturones desérticos se hubieran probablemente extendido simplemente en virtud de los cambios climáticos. Sin embargo, los hombres de ciencia están convencidos de que tal desarrollo fue considerablemente acelerado por las actividades humanas.

La extensión de las zonas inicialmente madereras pero que fueron transformadas en desérticas por el hombre fue estimada, en 1957, por el experto forestal alemán JOHANNES WECK, en unos 4,5 millones de kilómetros cuadrados. MOHAMMED KASSAS, de la Universidad del Cairo, sugirió en 1976 que las áreas desérticas, como resultado de las actividades humanas, casi alcanzaban una extensión igual a la que totalizan el conjunto de todas las tierras dedicadas a cultivos sobre la superficie terrestre, que viene a ser de unos 14 millones de kilómetros cuadrados; una tercera parte de esta tierra dedicada a la agricultura, es decir, unos 5 millones de kilómetros cuadrados, se habrán transformado en tierras desérticas al final del presente siglo, en caso de que persistan las tendencias actuales, de acuerdo con un pronóstico hecho por los expertos en una Conferencia de las Naciones Unidas celebrada en Nairobi, en septiembre de 1977 [15].

Cabe suponer que la mayor parte de la tierra dedicada en la actualidad al cultivo y al pastoreo fue creada como consecuencia de la limpieza llevada a cabo en zonas forestales (véase la tabla 2 respecto a datos numéricos relativos a superficies). Análogamente, las sabanas tropicales no representan la vegetación original de tales áreas; tal como explica el ecólogo alemán SIGMUND REHM, estos «improductivos desiertos de hierba» se desarrollaron a partir de zonas forestales en virtud de una incorrecta explotación del suelo [16]; en el mismo sentido algunos botánicos de la Universidad de la Ciudad de México hablan acerca de «sabanas de origen antropogénico (producidas por el hombre) y de sabanas ligadas a tierras madereras», en el mismo México, América del Sur, Asia y África [17], y casi

---

[15] Véase J. WECK, *Die Walder der Erde,* Gotinga, 1957, pág. 99. Véase *New Scientist, 12,* 4, 1976, y 75, 582, 1977 (informes de la conferencia del UNCOD).

[16] S. REHM, *Umschau, 73,* 44, 1973.

[17] A. GÓMEZ-POMPA y coLs., *Science, 111,* 762, 1972.

por todas partes de los países mediterráneos, donde hoy se encuentran arbustos y matorrales, antes, en tiempos de griegos y romanos existieron genuinas zonas forestales.

La tala de tales bosques, que cubrían las áreas que actualmente están dedicadas a cultivos agrícolas, por sí sola, ha significado que la cantidad de carbono almacenado en las plantas que viven sobre la Tierra ha sido reducida en unos 170.000 millones de toneladas. Esta reducción, calculada de acuerdo con los datos del ecólogo americano ROBERT H. WHITTAKER, se inició coincidiendo con el principio de la civilización humana [18], que corresponde, aproximadamente, a un 25 por 100 del carbono almacenado en forma de dióxido de carbono atmosférico. Además, el carbono de todas estas zonas forestales transformadas en sabana, maleza o desierto, fue oxidado y, como consecuencia, la mayor parte del humus fue también destruido. Por tanto, cabe suponer que durante los últimos milenios, en virtud de las actividades humanas, se transformó en dióxido de carbono una cantidad de carbono que, probablemente, no fue muy inferior al que hoy existe en la atmósfera.

Con tal de que tales procesos tengan lugar lentamente, el dióxido de carbono adicional producido es absorbido por los océanos, de modo que no es probable que se origine una considerable acumulación en la atmósfera. Durante los dos últimos siglos, sin embargo, el ritmo a que se lleva a cabo la destrucción de la riqueza forestal ha venido aumentando de forma alarmante. Ecólogos y biólogos, casi con absoluta unanimidad, son de la opinión de que el incremento del contenido del dióxido de carbono en la atmósfera que viene registrándose durante las últimas décadas, no ha sido tan sólo debido a un aumento en el consumo de combustibles fósiles, sino también a la destrucción de la riqueza forestal y del humus.

Desgraciadamente, los datos fidedignos acerca de las áreas forestales globales y sus variaciones anuales son muy escasos; las estadísticas de la Organización Mundial para la Alimentación y Agricultura (FAO) son insuficientes, en opinión de GEORGE WOODWELL. El inventario del Programa Biológico Internacional constituye tan sólo una primera estimación que, por tanto, resulta digna de poco crédito. No obstante, existen muchos informes individuales, la mayor parte de los cuales describen la situación

[18] R. H. WHITTAKER y G. E. LIKENS, en: WOODWELL y PECAN (eds.), página 295.

tal como se presenta en países tropicales, y todas ellas constituyen un alarmante mosaico.

La gigantesca cuenca amazónica del Orinoco, con su extensión de unos 4 millones de kilómetros cuadrados, constituye la mayor área forestal coherente sobre la Tierra; el gobierno brasileño está trazando unos planes que proponen que la mayor parte de esta primitiva riqueza forestal quede convertida en tierras de cultivo o bosques de cultivo secundario hacia el fin del presente siglo. Tal transformación, llevada a cabo sin tener en cuenta las condiciones locales, es muy probable que finalice en desastre (E. F. BRÜNIG, Institute of World Forestry, Universidad de Hamburgo, RFA) [19].

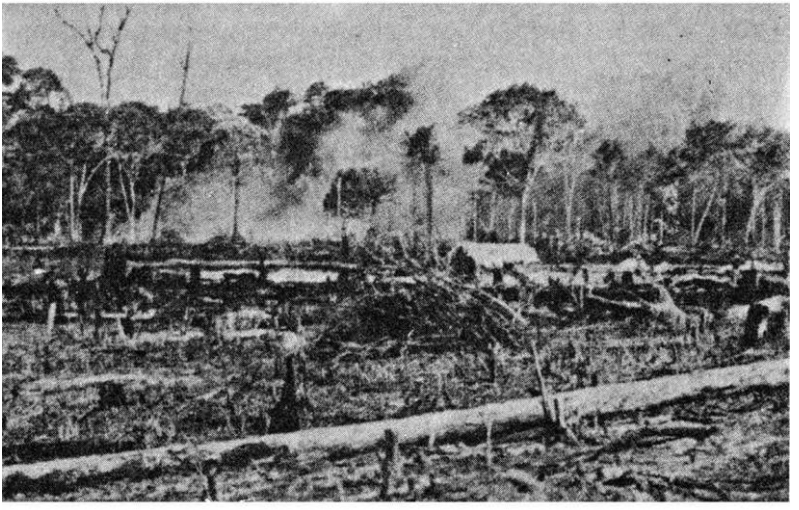


FIG. 3. Clareado de una selva por combustión, en la cuenca del Amazonas. Los planes del gobierno del Brasil para convertir la selva tropical, con lluvias en tal área, en tierra de cultivo, de pastos y selva cultivada, probablemente han de terminar en un desastre ecológico. (Foto de F. MÜLLER-MAY, *Bild der Wissenchaft.)*

[19] E. F. BRÜNIG, *Umschau, 74,* 405, 1974.

TABLA 2

Producción neta primaria y biomasa de diversos sistemas ecológicos (las cifras, en cantidad de carbono *)

	Area ($km^2 \cdot 10^6$)	*Producción neta primaria* *Intervalo* (g/m^2 por año)	*Producción neta primaria* *Promedio* (g/m^2 por año)	*Producción neta primaria* *Total* (miles de millones de toneladas)	*Biomasa* *Intervalo* (g/m^2 por año)	*Biomasa* *Promedio* (g/m^2 por año)	*Biomasa* *Total* (miles de millones de toneladas)
Selva tropical con lluvias **	17	450 – 2.250	900	16,8	3 – 36	20	340
Selva tropical estacional	7,5		720	5,4		16	120
Selva templada permanentemente verde	5	270 – 1.350	585	2,9	3 – 90	16	80
Selva templada de hoja caduca	7		540	3,8		13,5	95
Selva boreal	12	180 – 900	360	4,3	3 – 18	9	108
Total en selvas	*48,5*		*684*	*33,2*		*15,3*	*743*
Tierras madereras y arbustos	8,5	90 – 540	320	2,7	1 – 9	2,7	22
Sabana	15	90 – 900	410	6,1	0,1 – 6,7	1,8	27
Praderas templadas	9	65 – 675	265	2,4	0,1 – 2,3	0,7	6,3
Tundra y pradera alpina	8	4,5 – 180	65	0,5	0,05 – 1,4	0,3	2,4
Desierto con arbustos	18	4,5 – 110	40	0,7	0,05 – 1,8	0,33	5,9
Desierto (arena, roca, hielo)***	24	0 – 5	1,4	0,03	0 – 0,1	0,01	0,2
Tierra de cultivo	14	45 – 1.800	290	4,1	0,2 – 5,4	0,5	7
Pantanos, marismas, ciénagas	2	360 – 1.800	1.350	2,7	1,5 – 22,5	6,8	13,6
Lagos y mares	2	45 – 675	200	0,4	0 – 0,05	0,01	0,02
Total en tierras	*149*		*355*	*52,8*		*5,55*	*827,5*

	Área ($km^2 . 10^6$)	Producción neta primaria: Intervalo (g/m² por año)	Producción neta primaria: Promedio (g/m² por año)	Producción neta primaria: Total (miles de millones de toneladas)	Biomasa: Intervalo (g/m² por año)	Biomasa: Promedio (g/m² por año)	Biomasa: Total (miles de millones de toneladas)
Océano	332	1 — 360	56,5	18,7	0 — 0,002	0,0014	0,45
Zonas con flujo frío procedente de aguas profundas hacia la superficie	0,4	90 — 270	225	0,1	0 — 0,02	0,01	0,004
Banco de arena continental	26,6		162	4,3		0,005	0,12
Arrecifes	0,6	225 — 1.800	1.000	0,6	0,02 — 1,8	0,9	0,54
Estuarios	1,4		810	1,1		0,45	0,63
Total de océanos	*361*		*69*	*24,8*		*0,005*	*1,74*
Total Tierra	510		152	77,5		1,63	829

◄ [De WHITTAKER y LIKENS; las cifras corresponden al año 1950; ambos autores revisan reiteradamente estos datos. Véase WHITTAKER, *Communities and Ecosystems*, Nueva York, 1970; R. H. WHITTAKER y G. E. LIKENS, en G. M. WOODWELL y E. V. PECAN (ed.), *Carbón and the Biosphere*, Springfield, Estados Unidos, 1973; R. H. WHITTAKER y G. E. LIKENS, en H. LIETH y R. H. WHITTAKER (eds.), *Primary Producíivity of the Biosphere*, Nueva York, 1975. Cifras análogas se encuentran también en H. LIETH, *Umschau*, 74, 171, 1974.]

* Estas cifras corresponden al contenido de carbono de la sustancia orgánica, que representa alrededor del 45 por 100 de la masa seca.

** Según el World Wildlife Fund, tan sólo 9,5 millones de kilómetros cuadrados de selvas con lluvias subsistían en 1975 (pág. 79).

*** De acuerdo con LIETH (lugar citado), de los 24 millones de kilómetros cuadrados de desierto, 15,5 millones corresponden a desiertos de hielo, donde prácticamente no puede tener lugar la producción primaria.

En 1910, un 60 por 100 de la superficie del estado de Sao Paulo (250.000 kilómetros cuadrados) estaba cubierta por selva virgen; en 1950, sólo el 20 por 100 continuaba de la misma forma, pero la deforestación proseguía a un ritmo algo más lento. En el estado de Paraná y en el período comprendido entre 1953 y 1963, un promedio del 3 por 100 de la riqueza forestal existente en 1953, de unos 65 000 kilómetros cuadrados, era eliminada cada año mediante la quema de los árboles caídos, lo que ocasionaba una pérdida económica valorada en unos 2,5 millones de dólares americanos... La reforestación en Paraná se estima que es del orden del 10 por 100 de las talas; tan sólo en los años más recientes tal reforestación alcanzó el 20 por 100 de las talas efectuadas en Sao Paulo (J. A. S. ADAMS y otros, Instituto Geofísico, Universidad de Sao Paulo, Brasil) [20].

Es tan sólo la caída del follaje, finalmente distribuida a lo largo del año, la que nutre la vegetación y mantiene el equilibrio biológico de la primitiva riqueza forestal; tan pronto como es cortado por el hombre, los suelos resultan rápidamente exhaustos y llegan a ser totalmente estériles (H. GRABERT, Geologisches Landesamt, Krefeld) [21].

En las selvas tropicales vírgenes, la radiación solar recibida resulta absorbida por el dosel formado por las hojas; virtualmente, ninguna radiación penetra hasta el suelo y lo calienta. La evaporación del agua viene casi exclusivamente regulada por la propia transpiración de los árboles.

[20] J. A. S. ADAMS y cols., *Science, 196*, 54, 1977.

[21] H. GRABERT, *Umschau, 74*, 246, 1974.

Cuando se tala el bosque, o parte del mismo, gran parte de la radiación solar llega hasta el suelo, con lo cual la evaporación procedente del mismo resulta notablemente reforzada; en consecuencia, la capa superficial del suelo se seca enseguida, poniéndose en peligro el suministro del agua a las plantas. Cuando llueve con gran intensidad, el impacto de las gotas contra el suelo da lugar a que se forme una dura costra en el suelo, una vez que éste queda seco, que impide que se realice el suministro de oxígeno, procedente de la atmósfera, y que de tal vital importancia resulta para la respiración de las raíces. En el caso de los métodos de cultivo tradicionales, tales consecuencias no resultan tan importantes; no obstante, la introducción del arado y la racionalización de las cosechas (monocultivos), como es corriente en la agricultura practicada en latitudes medias, determina que el suelo quede al descubierto, o tan sólo parcialmente cubierto por plantas, durante largos períodos; por tanto, la probabilidad de que se produzcan cambios estructurales dañinos viene incrementada por tales métodos, frente a la que ocurría con los métodos agrícolas «primarios» (S. REHM, del Instituto de Agricultura Tropical y Subtropical, Universidad de Gotinga) [22].

En más del 95 por 100 de las viviendas, en los países en vías de desarrollo, donde abunda el combustible en forma de madera, su utilización representa la fuente primaria de energía; análogamente, en tales países, industrias como la fabricación de ladrillos, manufacturas cerámicas, pesquerías y elaboración de tabaco, industrias conserveras, producción de caucho y de azúcar, fundiciones de estaño y producción de acero, todas vienen a consumir en mayor o menor grado madera como combustible. En aquellas zonas en las que puede disponerse fácilmente de buena madera tan sólo se recogen las ramas muertas, pero donde existe escasez se recurre a los nuevos árboles jóvenes y, por último, los árboles maduros son talados especialmente por el propio industrial carbonero de la localidad. La excesiva demanda exigida de tierras madereras y zonas forestales ha conducido, en ciertas áreas, a un despojo de la tierra. La eliminación del manto vegetativo ha determinado, asimismo, un incremento de la erosión sufrida por el suelo, la cual, por lo menos, determina una pérdida de tierra superficial que, en el peor de los casos, puede dar lugar a inundaciones masivas en los valles recorridos por los ríos y en los deltas de estos últimos. De

[22] Rehm.

análoga manera, el corte continuo de madera, como combustible, en la región situada al sur del Sahara y Sahel, ha facilitado el rápido corrimiento del propio desierto hacia el sur (K. OPENSHAW, del International Forestry Science Consultancy, Penicuik, Escocia, quien estudió el consumo de la madera en los países en vías de desarrollo, por encargo de la FAO) [23].

Las zonas más bajas del Himalaya nos dan hoy día una triste imagen de la inhumana actitud del hombre frente a la Naturaleza; desde Cachemira a Birmania, una amplia faja de tierra se ha convertido en estéril y desolada, en zonas en las que antes vivían los tigres en plena y lozana zona forestal (A. AGARWAL, corresponsal científico del *Iridian Express*) [24].

En la parte central del este de México, una población rural que se encuentra en fase de rápida expansión está aclarando los montes forestales a un ritmo impresionante, al tiempo que se mantienen los métodos agrícolas tradicionales; recientemente, el indispensable período en que hay que dejar las tierras en barbecho viene siendo progresivamente recortado, y todo ello implica a zonas extensas que, inicialmente, fueron forestales; esta tala incontrolada es muy probable que llegue a representar serias amenazas para el futuro del país; las consecuencias más probables son una creciente erosión, un descenso del nivel freático y tormentas de polvo (H. ERN, de la Universidad de Constance) [25].

Si las exigencias de una población en aumento requieren períodos de regeneración de los bosques más cortos y tiempos de cultivo de mayor duración, la única consecuencia va a ser que se registre una notable disminución en la producción global de las cosechas; sobre un terreno forestal exhausto, la regeneración se hace más débil, y gradualmente van dominando las hierbas perennes; como resultado, se producen amplias zonas de tierra inutilizable, cubiertas por hierbas, tales como Alang-Alang. Tan sólo en Indonesia, más de 15 millones de hectáreas se encuentran en tales condiciones, lo que representa una extensión superior a la superficie total utilizada para la agricultura, incluyendo no tan sólo el cultivo de árboles sino también las áreas dedicadas a pastos (S. REHM) [26].

---

[23] K. OPENSHAW, *New Scientist, 61,* 271, 1974.

[24] A. AGARWAL, *New Scientist, 67,* 386, 1975.

[25] H. ERN, *Umschau, 73,* 85, 1973.

[26] Rehm.

Al ritmo actual de destrucción con que van desapareciendo las zonas forestales de lluvias tropicales por todo el globo, existe un grave riesgo de que se produzca la extinción masiva de miles de especies. Esto se debe al simple hecho de que las primitivas especies arbóreas, de las selvas con lluvias tropicales, son incapaces de recolonizar grandes superficies, abiertas a una agricultura intensiva o extensiva (A. GÓMEZ-POMPA y otros, de la Universidad de la Ciudad de México) [27].

En Costa Rica, el Instituto Gubernamental para la Colonización puede limpiar una hectárea en dos horas; en Kalimantan (Borneo, Indonesia), la International Timber Corporation, de Indonesia, está llevando a cabo la explotación forestal a un ritmo de 60.000 metros cúbicos mensuales, pero espera llegar a obtener pronto 80.000 metros cúbicos por mes. Sí tales actitudes y prácticas actuales persisten, toda la riqueza forestal con lluvias tropicales, con excepción de algunos enclaves científicos, habrá sido destruida, dentro de veinte o treinta años (ROBERT ALLEN, de la International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources, Morges, Suiza) [28].

A comienzos de la década de los años setenta, las selvas tropicales se extendían cubriendo alrededor de unos 20 millones de kilómetros cuadrados; el material que crecía en dicha área contenía casi 10 billones de toneladas de biomasa (materia seca), más de la mitad de la cual se encontraba en bosques con lluvias tropicales. Al presente ritmo anual de destrucción, de 0,3 millones de kilómetros cuadrados de tales bosques, habrá desaparecido de tal zona, para fines de siglo, la riqueza forestal natural existente sobre tierras de fácil acceso. En este proceso, por lo menos, 300.000 millones de toneladas de materia seca habrán sido quemadas o descompuestas, consumiendo para ello 400.000 millones de toneladas de oxígeno (0,03 por 100 del oxígeno almacenado en la atmósfera), con desprendimiento de 550.000 millones de toneladas de dióxido de carbono (lo que equivale a una cuarta parte del que se almacena en la atmósfera). Del 10 al 20 por 100 de este dióxido de carbono, desprendido en la atmósfera, podrá ser, finalmente, fijado de nuevo por la vegetación sustitutiva; el 40 por 100 puede

[27] Gómez-Pompa y cols.

[28] R. ALLEN, *New Scientist, 66,* 178, 1975.

ser retenido por los océanos, pero aproximadamente, otro 40 por 100 permanecerá en la atmósfera y ocasionará un incremento del contenido en dióxido de carbono atmosférico del orden del 10 por 100 respecto al nivel actual (E. F. BRÜNIG) [29].

Además, grandes cantidades de dióxido de carbono son liberadas en el proceso de la destrucción del humus, subsiguiente a la deforestación; por otra parte, no son tan sólo y meramente las selvas con lluvias tropicales las que están siendo destruidas, sino también otras, y no solamente en los países en vías de desarrollo, pues ocurre también en países altamente industrializados, como Canadá y la Unión Soviética. En particular, la apertura de Siberia va asociada a la destrucción de considerables reservas forestales [30].

«¿Sabe usted si existen proyectos en sentido contrario, es decir, que tiendan a incrementar la riqueza forestal?», preguntó el autor al profesor WOODWELL.

«Sí, en efecto —contestó—. En Europa, ciertas tierras de agricultura marginal y de pastos están siendo continuamente transformadas en zonas forestales. También existían tendencias análogas en el este de los Estados Unidos, pero al parecer tales proyectos están actualmente interrumpidos o abandonados. Hay información acerca de grandes programas de repoblación forestal en China, aunque conocemos muy poco acerca de sus éxitos; tampoco sabemos si los bosques nuevamente creados se están desarrollando satisfactoriamente. Además, puede persistir todavía un lento desplazamiento hacia el norte del límite septentrional de las zonas forestales, con lo que podría existir allí un aumento marginal de tales zonas; frente a la masiva destrucción forestal, sin embargo, tales cambios serían de poca importancia, de modo que, globalmente hablando, tengo la seguridad de que en conjunto están reduciéndose, y que la biomasa también va disminuyendo» [31].

---

[29] E. F. BRÜNIG, *Ambio, 6,* 1970, 1977 (ligeramente corregida).

[30] Véase, por ejemplo, M. E. ADZHIEV, *Priroda, 8,* 1975; algunos extractos de este artículo fueron traducidos y publicados en *New Scientist...* La situación en Canadá se describe en *New Scieníist, 73,* 24, 1977.

[31] Véase, por ejemplo, G. M. WOODWELL y R. A. HOUGHTON, en: W. STUMM (ed.), pág. 61; también en G. M. WOODWELL, *Scientific American,* enero, 1978, pág. 34.

En los países en vías de desarrollo, la riqueza forestal es a menudo incinerada, es decir, transformada inmediatamente en dióxido de carbono, con objeto de limpiar la tierra para dedicarla a cultivos agrícolas primitivos. Unas dos terceras partes de la producción maderera mundial es utilizada como combustible [32]; de la tercera parte restante una considerable fracción se destina a la fabricación de papel u otros productos que resultan quemados o putrefactos, al cabo de cortos períodos de tiempo. El tiempo promedio de vida de la madera de construcción, traviesas de ferrocarriles y madera utilizada en trabajos de carpintería viene a ser probablemente del mismo orden de magnitud que la propia de la madera en estado natural. Tan sólo un pequeño número de artefactos construidos con madera quedan eliminados del ciclo natural, durante siglos y tal vez milenios, pero la cantidad de carbono en ellos almacenada durante tan largos períodos resulta ser, no obstante, tan pequeña que indudablemente puede ser ignorada y despreciada en el balance global.

1.3. LA EROSION Y LA PERDIDA DE OXIGENO

La destrucción forestal no ocasiona solamente un aumento en el contenido de dióxido de carbono atmosférico, sino que también da lugar a otras consecuencias que, por lo menos a corto plazo, tienen incluso un mayor impacto. Las zonas forestales son como gigantescas esponjas, capaces de almacenar agua procedente de la precipitación y que luego puede ser gradualmente desprendida, tanto por medio de la evaporación como por el lento fluir de las aguas que discurren por la superficie del suelo y subsuelo. Los bosques actúan como filtros de polvo, protegen contra deslizamientos de tierras y avalanchas e incluso en estrechas franjas son capaces de suministrar protección contra el viento y ruidos. Todos estos benéficos efectos que, en una u otra forma, influyen en la atmósfera, se pierden en cuanto se destruye la zona forestal o bosque.

Siempre que se procede a la tala de bosques para la producción de madera para la construcción sólo puede mantenerse el ritmo de rendimiento cuando la deforestación y repoblación forestal avanzan paralelamente, mano a mano; pero, en la mayor parte de los casos, no obstante, y muy

[32] Openshaw.

especialmente en los países en vías de desarrollo, la norma general es que la explotación se lleve a cabo sin la menor restricción. Los culpables no son únicamente los pobres e ignorantes campesinos, necesitados de madera para su utilización como combustible, sino también las grandes compañías madereras que, por lo general, ni conocen las condiciones locales, ni están en contacto con los pobladores de la zona afectada [33].

En la India se produjo un amplio movimiento de desobediencia civil, entre los habitantes de las laderas meridionales del Himalaya, contra los temerarios métodos de la industria de la madera; con objeto de evitar que prosiguiera la tala de los árboles, los naturales de la zona se abrazaban a los árboles que iban a ser talados; esta resistencia no violenta, del tipo propugnado por GANDHI, obligaba a menudo a retirarse a las brigadas encargadas de llevar a cabo los trabajos de tala [34].

En muchos casos los bosques son eliminados con objeto de obtener nueva tierra de cultivo que permita incrementar la producción de alimentos; pero esto no se suele conseguir, especialmente cuando se trata de regiones con pendientes escarpadas, debido a que los subsiguientes cambios en la distribución de aguas, avenidas, erosión del suelo y corrimiento de tierras determinan, de hecho, una disminución en la producción total de alimentos en la región, a pesar de que se incrementara el área dedicada a cultivos.

Cuando las montañas carecen de protección forestal, cada tormenta importante es capaz de dar lugar a desastrosas avenidas; en opinión de K. OPENSHAW [35], «La causa principal de las recientes avenidas e inundaciones registradas en el subcontinente de la India ha sido la eliminación de la protección arbórea en las zonas de captura y recogida de aguas». Por otra parte, A. AGARWAL informa acerca de la producción de desastrosas avenidas registradas en la zona del río Alakananda, tras una deforestación total sufrida en aquella zona, en el año 1970; toda una aldea y varios autobuses ocupados por turistas fueron arrastrados por las aguas, y en el transcurso de unas horas resultaron destruidos cinco puentes de la red de carreteras,

---

[33] J. TINKER, *New Scientist, 63,* 819, 1974.

[34] Agarwal.

[35] Openshaw.

trece puentes suspendidos y dos pasarelas de madera; posteriormente prosiguió la devastación cuando la enorme cantidad de sedimentos arrastrados por el aluvión quedó depositada en las tierras bajas, bloqueando unos 10 kilómetros de un importante canal de irrigación [36]. Un informe presentado en el VIII Congreso Forestal Mundial, que tuvo lugar en Jakarta, en 1978, menciona que el embalse de Mangla, en Pakistán, recibe unos 100 millones de toneladas de sedimentos cada año, de los que las cuatro quintas partes proceden de la cuenca de captura del río Jhelum, que fue sometida a deforestación; aunque el embalse fue construido pensando en que tendría una vida de unos cien años, en realidad su capacidad pudiera muy bien resultar perdida en menos de la mitad del mencionado tiempo [37].

En los primeros años de la década de los años setenta, los bosques de pinos que cubrían las laderas septentrionales del Pico de Orizaba, en México, fueron cortados, hasta una cota de unos 3 500 metros sobre el nivel del mar, con objeto de ganar nuevas tierras de cultivo para la producción de trigo y patatas; pues bien, a principios de 1974, el geógrafo KLAUS HEINE, de Bonn, ya encontraba que se había producido un surco de erosión en el lugar, con una extensión de 350 metros, una anchura de 5 a 30 metros y profundidad de 4 a 10 metros; todo ello le llevó a predecir que «dentro de muy pocos años la agricultura en tales pendientes resultará imposible» [38].

Siempre ha venido sucediendo de la misma manera, pues desde los primeros tiempos en que se iniciaron las actividades agrícolas de la Humanidad el hombre ha venido abusando de su ambiente, explotando la tierra hasta que resultaba agotada e incapaz de producirle más. Esto determinó el ocaso del imperio de los sumerios, en el Oriente Medio, que floreció hace cinco mil años, así como de otras muchas e importantes culturas que siguieron la misma suerte. En la antigüedad, hombres como PLATÓN y OVIDIO ya se lamentaron de lo que hoy nosotros denominaríamos destruc-

[36] Agarwal.

[37] N. MYERS, *New Scientist, 80,* 951, 1978.

[38] K. HEINE, *Umschau, 16,* 202, 1976.

ción del medio ambiente. En América, mucho antes de que fuera «descubierta» por el hombre blanco, la ciudad azteca de Teotihuacán ya estaba rodeada de un cinturón de tierra erosionada [39].

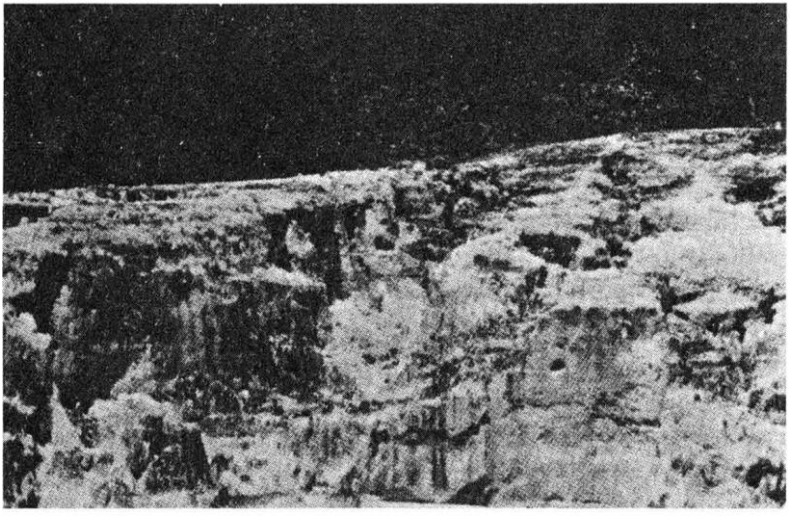


FIG. 4. Como resultado de la eliminación de la capa protectora forestal se producen profundos surcos por erosión. En la estación de las lluvias, la capa fértil del suelo superior, que en los trópicos generalmente es delgada, resulta rápidamente eliminada. (Foto de F. MÜLLER-MAY, *Bild der Wissenchaft.)*

Ni los habitantes de Sumeria, ni los antiguos griegos o aztecas, pudieron prever las consecuencias de sus modalidades de cultivo, e incluso en nuestros tiempos, los pobres campesinos sin tierras de México o el Sahel, no saben a menudo que al destruir sus zonas forestales están amenazando las raíces de sus propias existencias. Pero nosotros, los habitantes de los países altamente industrializados, sabemos realmente cuáles son las consecuencias y sabemos también la forma en que podemos obtener suficientes alimentos sin tener que destruir totalmente el medio ambiente natural. Pero tal conocimiento raramente se ve reflejado en nuestras ayudas para el

[39] W. SANDERMANN, *Umschau, 73,* 51, 1973; para seguir una discusión sobre el impacto de la erosión, en términos generales, véase, por ejemplo, E. P. ECKHOLM, *Losing Ground,* Norton, Nueva, York, 1976.

desarrollo; en vez de ello, facilitamos excavadoras mecánicas y sierras automáticas a la India, para destruir la riqueza forestal del Himalaya, a una velocidad superior a la que lo hicieron romanos y venecianos en las montañas de Dalmacia.

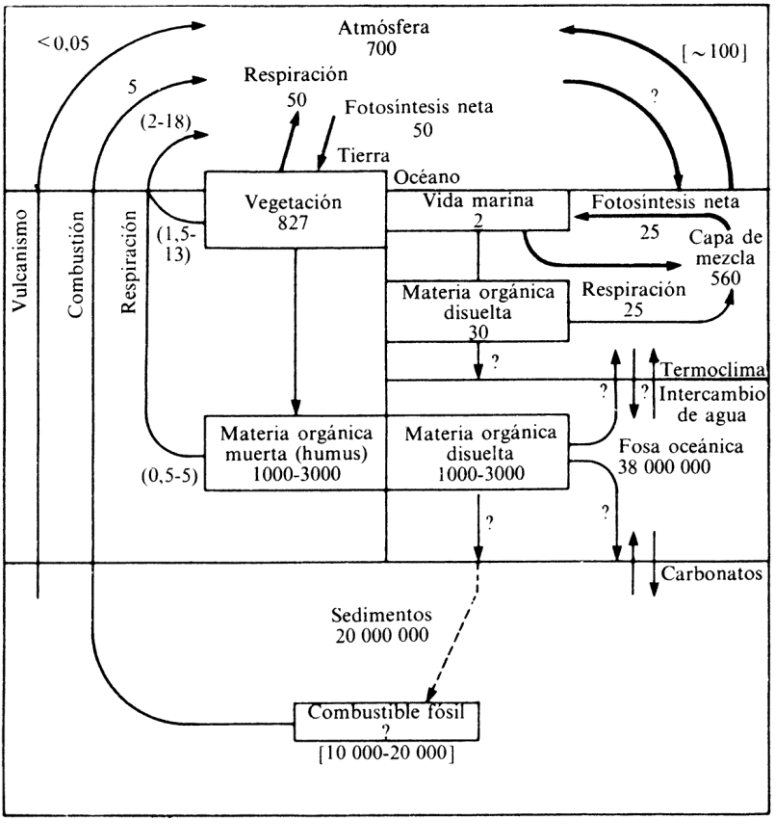
A 40 kilómetros al norte de Roma existe un pequeño lago, llamado de Monterosi; durante el siglo segundo antes de Cristo, los romanos construyeron la Via Cassia a través de esta región, y con ello la abrieron a la civilización humana; hoy día los geólogos han examinado el material depositado en el fondo del lago y con ello han podido lograr una información que refleja exactamente las consecuencias que desde entonces y hasta hoy han tenido las actividades humanas. Antes de que fuera construida la Via Cassia, el ritmo medio de erosión era de 2 a 3 centímetros, cada mil años, pero desde que se iniciaron los «cultivos» en la región, pasó a ser de unos 20 centímetros por milenio [40].

Medidas de erosión llevadas a cabo en el estado de Mississippi condujeron a unos ritmos medios de erosión, o pérdida de tierras superficiales, anuales que alcanzan a ser de 10 a 15 kilos por hectárea (kg/ha) para los bosques, de 800 kg/ha en las tierras de pastoreo, hasta llegar al tremendo ritmo de erosión de 10 toneladas por hectárea para los terrenos de cultivo. Tales resultados fueron confirmados por otros científicos, tanto de los Estados Unidos como de Europa. Por lo que respecta a la superficie total de los Estados Unidos, el geólogo americano SHELDON JUDSON estima que el ritmo de erosión actual es, por lo menos, tres veces superior al que existía antes de la civilización [41].

FIG. 5. Balance del ciclo global del carbono, según G. M. WOODWELL; las unidades en que vienen expresadas las cifras que se refieren a los distintos depósitos de reserva, corresponden a 1.000 millones de toneladas de carbono; las unidades para las velocidades o ritmos de transferencia, en 1.000 millones de toneladas de carbono por año. Las cifras entre paréntesis representan evaluaciones procedentes de diversas fuentes. La capa termoclina representa la separación entre las capas superficiales, sometidas a variaciones térmicas estacionales y las aguas profundas, permanentemente frías; a través de tal superficie existe tan sólo un intercambio muy pequeño de aguas. Para mayor detalle acerca del ciclo del carbono véase el capítulo 3. (De G. M. WOODWELL, *Scientific American*, 1978, pág. 9). ►

[40] S. JUDSON, *Science, 160,* 1444, 1968.

[41] S. JUDSON, American Scientist, 56, 356, 1968.



Antes de que se iniciaran las prácticas agrícolas, la masa total de arena, guijarros y humus transportada hasta los océanos por todos los ríos terrestres era, según cálculos de JUDSON, de unos 9 000 millones de toneladas por año; su colega B. GREGOR, utilizando distintos métodos de cálculo, llega a obtener la cifra de 10 a 11.000 millones de toneladas por año [42]. Ambos científicos concuerdan en afirmar que a mitad del presente siglo tales cifras habían aumentado ya, hasta ser de unos 24 000 millones de

[42] S. JUDSON, American Scientist; B. GREGOR, Nature, 228, 273, 1970.

toneladas por año. Pero, a consecuencia de la masiva destrucción forestal, la erosión ha seguido creciendo más. De acuerdo con uno de los trabajos presentados en la Conferencia de Dahlem, en los que se daban datos preliminares, el ritmo actual se estima que ya viene a ser cuatro veces superior al promedio correspondiente a los últimos setecientos millones de años [43].

En relación a la composición de la atmósfera, los resultados anteriores son más importantes de lo que a primera vista pudiera parecer; el que aumente la erosión significa que cada año más rocas quedan al desnudo y expuestas al oxígeno atmosférico; en consecuencia, cantidades crecientes de materiales oxidables, contenidos en las rocas, y especialmente hierro, carbono y azufre, reaccionan con el oxígeno, con lo que se produce un aumento en las pérdidas geológicas de oxígeno; a la larga, es decir, en el transcurso de millones de años, esto podría conducir a una notable reducción del nivel del oxígeno atmosférico.

1.4. ¿SON LAS ALGAS PRODUCTORAS DE OXIGENO?

En los océanos, la fotosíntesis viene, casi exclusivamente, mantenida por miríadas de pequeñas algas microscópicas. La contribución de plantas mayores multicelulares es insignificantemente pequeña. Todos los restantes organismos del océano, desde el diminuto plancton animal hasta las gigantescas ballenas, viven directa o indirectamente de la sustancia orgánica producida por dicha tremenda cantidad de algas unicelulares, utilizando también el oxígeno que se libera en la fotosíntesis de tal sustancia. Si no tenemos en cuenta las ballenas y los otros pocos seres vivos con pulmones que viven en el mar, así como la captura de peces por el hombre, nos encontramos con un ciclo natural de gases disueltos que nunca llegan a entrar en la atmósfera.

El promedio de vida de las algas, y de los pequeños animales que se nutren de ellas, varía desde unas pocas semanas a unos cuantos meses, mientras que la de los animales mayores, al otro extremo de la cadena alimentaria, no excede nunca de algunas decenas de años. La masa total de las plantas marinas viene a ser del orden de la milésima parte de la biomasa existente sobre la Tierra. La masa de todos los animales viene a ser igual

[43] R. M. GARRELS y A. LERMAN, en: STUMM (ed.), pág. 26.

a la de todas las plantas, en el océano, y, por tanto, es análoga a la de todos los animales existentes sobre los continentes, mientras que en tierra los animales constituyen tan sólo una milésima parte de la biomasa total (página 22) [44].

En los océanos, la desintegración de las sustancias orgánicas se verifica principalmente a través de la cadena alimentaria de los animales; además, existe una oxidación directa, de tipo no biológico, de los restos de microorganismos muertos o sustancias disueltas. En comparación con los procesos de desintegración que se producen en tierra, bacterias y hongos son mucho menos importantes. Alguna parte de cada organismo marino que muere, así como la materia fecal, se hunde hasta el fondo del océano, donde sirve de alimento a gran número de especies animales. La masa total de excrementos, algas muertas y animales muertos que inicialmente flotan pero que poco a poco van hundiéndose hacia mayores profundidades resulta ser enorme, ya que se calcula que viene a representar una masa mil veces superior a la de todos los organismos vivos de los océanos; también resulta comparable, e incluso superior, a la masa total de humus sobre la tierra. El tiempo medio de permanencia del carbono en este depósito de reserva se estima en unos tres mil años; por tanto, resulta considerablemente mayor que el tiempo de permanencia en el tercer depósito sobre los continentes.

En la década de los años cincuenta la gente todavía creía que el gigantesco volumen de los océanos produciría cantidades enormes de materia orgánica; la contribución de los océanos a la fotosíntesis de todas las plantas era estimada en una magnitud de alrededor del 60 al 80 por 100; sin embargo, investigaciones más recientes han puesto de manifiesto que la fertilidad de los océanos es bastante menor, y que su productividad llega a ser tan sólo entre una quinta y una cuarta parte de la productividad media sobre los continentes. Así pues, dado que la extensión superficial de los océanos es de alrededor del doble que la de los continentes, la contribución de los mares a la producción global de sustancia orgánica viene a ser, tan sólo, alrededor de una tercera parte [45].

---

[44] Véase, por ejemplo, R. H. WHITTAKER y G. E. LIKENS, en: Woo- DWELL y PECAN (eds.), pág. 281.

[45] Ibíd.

La baja fertilidad de los océanos es una consecuencia de la forma en que los nutrientes principales circulan en el seno del agua; no son sólo los compuestos de carbono los que se hunden conjuntamente con los organismos muertos, sino también los compuestos de nitrógeno y fósforo, y todos ellos van alcanzando, gradualmente, profundidades a las que no llega nunca la luz solar, por lo que resulta un medio hostil para el crecimiento de cualquier tipo de planta verde; en ausencia de este tipo de plantas y, por tanto, de fotosíntesis, no puede haber formación de nueva materia orgánica. En consecuencia, no hay forma mediante la cual los compuestos de nitrógeno o fósforo puedan ser incorporados de nuevo a los ciclos biológicos; en cambio, dichos elementos esenciales pasan a enriquecer las profundidades oceánicas, mientras existe a menudo carencia de ellos en las aguas superficiales en las que se necesitarían para el crecimiento de las plantas.

Por esta razón, la producción de materia orgánica, por unidad de superficie, para la mayor parte de los mares abiertos, es pequeña, hasta el punto de que escasamente supera a la de las áreas desérticas, y es inferior a la correspondientes a la tundra. Así pues, los océanos suelen considerarse como gigantescos «desiertos de agua», en los que ocasionalmente pueden encontrarse oasis fértiles, la mayor parte de los cuales se encuentran a lo largo de la línea costera, donde la productividad puede llegar a alcanzar la propia de las zonas forestales tropicales. Estas zonas son áreas fuentes de las que manan aguas profundas ricas en nutrientes, como, por ejemplo, las que se encuentran a lo largo de las costas antárticas, la corriente de Humboldt, que discurre a lo largo de las costas del Perú, o estuarios y lagunas que llevan nutrientes de origen continental.

Una pequeña fracción de la sustancia orgánica que se hunde hasta el fondo del océano, que de acuerdo con GARRELS y sus colegas viene a ser de 1,5 milésima parte del total, queda sepultada entre sedimentos [46]; alrededor de una tercera parte queda sometida a la desintegración bajo la acción de bacterias, y el resto se incorpora al cuarto depósito de reserva (pág. 19). La cantidad equivalente de oxígeno liberado a través de la fotosíntesis de tales compuestos de carbono permanece en la atmósfera como «excedente», hasta que el carbono enterrado en los sedimentos resulte oxidado, mediante procesos geológicos, lo que, por lo general, ocurre después de

[46] GARRELS y cols., *American Scientist.*

centenares de millones de años. Desde este punto de vista cabe decir que las algas producen realmente oxígeno; es esta milésima parte de su producción de oxígeno que no resulta reciclada, y que viene a totalizar unos 100 millones de toneladas anuales, la que suministra las compensadoras reservas, frente a las pérdidas geológicas de oxígeno que se producen por oxidación del hierro, azufre y gases volcánicos. A lo largo de las centenas de millones de años de la historia de la Tierra, ha sido gracias a este insignificante «excedente» anual a lo que se debe que el gigantesco «depósito» o reserva de oxígeno atmosférico haya podido ir acumulándose.

Donde la contaminación del océano, causada por el petróleo u otros productos químicos, determina una grave perturbación en la vida marina, surgen el peligro y la amenaza de que muchas zonas costeras, e incluso mares enteros, como el Báltico, se transformen en «desiertos de agua» debido a actividades humanas. Tales consecuencias, por muy lamentables y peligrosas que sean, tienen pocos efectos sobre la composición de la atmósfera, dado que la biomasa total de los organismos marinos es pequeña. Frente al consumo de oxígeno, por los procesos técnicos y la destrucción forestal, que se cifra en algunos miles de millones de toneladas anuales, el «excedente» producido por las algas viene a ser algo así como una gota en un cubo lleno de agua. Incluso en el caso de que la contaminación de origen antropogénico pueda llegar a reducir tal cantidad en varios millones de toneladas, el hecho tendría poco impacto sobre la atmósfera en las próximas décadas e incluso siglos venideros.

1.5. ¿ESTA EN PELIGRO EL OXIGENO ATMOSFERICO?

«¿Qué es lo que le hizo escoger este tema?», me preguntó el profesor MANFRED SCHIDLOWSKI, un geoquímico que dirige el grupo de investigación que se ocupa de la

«Historia de la Atmósfera», en el Max-Planck Institut für Chemie, cuando le visité en su laboratorio de Maguncia, mientras estaba preparando la publicación del presente libro.

«En realidad, todo empezó por una equivocación», fue mi respuesta.

«¿Cómo fue esto?»

«Yo creía que el oxígeno atmosférico estaba amenazado» —repliqué— . «Y en un libro anterior, en el que me ocupaba de problemas energéticos, planteé el problema de que tal vez en el futuro podría no haber suficientes

plantas sobre la Tierra para regenerar el oxígeno del aire [47], de forma que actualmente me interesa profundizar algo más en tal cuestión.»

Antes de que nuestra conversación hubiera llegado a este punto había estado interrogando al profesor SCHIDLOWSKI, durante un par de horas, acerca de las actividades de su grupo de investigación. Ahora, mientras estábamos almorzando juntos, nuestros papeles cambiaron: él planteaba las preguntas y yo le contestaba; le dije que con frecuencia había encontrado en la literatura científica estimaciones en el sentido de que, en muchos países industrializados, el consumo de oxígeno para fines industriales excedía, con mucho, a la regeneración del mismo, producida por la vegetación existente en tales regiones [48].

«Tales datos eran, desde luego, correctos —le dije—, pero dieron lugar a que yo razonara sobre ellos de forma incorrecta; para empezar, yo era de la opinión de que en los países industrializados, en cierto sentido, había que importar oxígeno de aquellas áreas en las que existe un exceso de producción, es decir, de los océanos. Estas importaciones, tal como escribí en mi libro, se logran gratuitamente y con toda facilidad, sin exigencias energéticas, gracias a los vientos. Sin embargo, ¿qué es lo que ocurrirá si, por una parte el consumo de oxígeno, por razones técnicas sigue aumentando, mientras que, por otra, se van destruyendo más y más algas, en virtud de la contaminación de los océanos? Realmente, yo había sobrevalorado la importancia del exceso de oxígeno engendrado en los océanos y, además, había subestimado la tremenda cantidad de oxígeno almacenada en forma de 'reserva' en la atmósfera.»

«¿Pero usted probablemente tiene en cuenta la circunstancia de que incluso en el caso de que todas las reservas, conocidas y estimadas, de combustibles fósiles fueran quemadas, el oxígeno atmosférico disminuiría tan sólo en una cantidad inferior al 3 por 100»? [49].

---

[47] G. BREUER, Die Herausforderung; Energie für die Zukunft — Gefahren und Móglichkeiten, C. Bertelsmann, Munich, 1975, página 29.

[48] Véase, por ejemplo, C. COLE LAMONT, *Umschau, 69,* 557, 1969; *Naturw. Rdsch., 27,* 74, 1972; TH. KELLER, *Schweiz. Ztschr. f. For- stwesen, 124,* 465, 1973.

[49] Véase, por ejemplo, W. S. BROECKER, *Science, 168,* 1537, 1970. De acuerdo con estimaciones de otros autores, las reservas de combustible fósil son menores; en consecuencia el 2 por 100 del oxígeno atmosférico bastaría para su combustión.

«Sí, pero yo creía que el problema principal consistía en algo distinto; el oxígeno es un producto de las plantas verdes, y constantemente viene regenerándose gracias a ellas; el hombre está destruyendo a un ritmo creciente las plantas, abatiendo zonas forestales, creando desiertos y contaminando océanos con petróleo y productos químicos, de modo que a lo largo de muchos litorales la vida difícilmente puede seguir subsistiendo. Por todo ello, pensé, si van quedando menos plantas sobre la Tierra, tal vez la mitad o las dos terceras partes, de las que existirían en condiciones naturales sin perturbar, quizá pueden surgir consecuencias en la relación a la abundancia del oxígeno en la atmósfera.»

Esta preocupación mía era compartida por muchos, continué, ya que, desde mediados de la década de los años sesenta, varios científicos bien conocidos habían venido expresando su preocupación acerca del oxígeno atmosférico. No tuve que aclarar este hecho en detalle a mi interlocutor, porque estaba familiarizado con el problema. Sin embargo, considero oportuno aportar algunas citas, relativas a este punto, para información de los lectores de este libro. En 1966, los bien conocidos científicos americanos L. V. BERKNER y L. C. MARSHALL, autores de un trabajo fundamental acerca del oxígeno atmosférico y su evolución, escribieron un memorándum en el que trataban del riesgo de que se produjera una rápida y drástica reducción de la concentración del oxígeno en el aire; aunque este trabajo no fue publicado ha sido citado por otros autores [50]. En 1967, durante la Conferencia de la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia, el ecólogo americano C. COLE LAMONT presentó un trabajo en el que se llegaba a la conclusión de que, en virtud de la polución de los océanos, podían estar en peligro tres cuartas partes de nuestros suministros de oxígeno [51]. En otras reuniones científicas tal pronóstico ha sido reiteradamente citado por otros estudiosos, y mereció amplios comentarios en los medios de difusión. También en Europa existió preocupación por este problema, al que se refirieron los periódicos de gran circulación, llegando incluso TH. KELLER, del Instituto Federal para Investigaciones Forestales, de

[50] Véase, por ejemplo, F. D. SISLER, en: S. F. SINGER (ed.), *The Changing Global Environment*, Reidel, Dordrecht, Boston, 1975, página 59.

[51] C. COLE LAMONT, *Bioscience*, 18, 679, 1968.

Birmensdorf, Suiza, a sugerir la introducción de una tasa sobre el consumo de oxígeno [52].

«¿Y cómo descubrió usted, finalmente, que seguía una pista falsa?», preguntó el profesor SCHIDLOWSKI.

«En realidad, no fue tan sencillo; en primer lugar, al estudiar la bibliografía encontré, desde luego, otras opiniones; entre ellas una respuesta del biólogo marino JOHN RYTHER a COLE LAMONT y, especialmente, un breve trabajo de su colega WALLACE S. BROECKER, en el que, de forma categórica, se afirmaba que las reservas de oxígeno en la atmósfera eran prácticamente ilimitadas [53]. Naturalmente, resultaba difícil para mí decidir quién de los dos, BROECKER O COLE LAMONT, tenía razón. No es raro el hecho de que los científicos defiendan teorías opuestas o conflictivas entre sí y que luego, a menudo, un análisis retrospectivo de las mismas ponga de manifiesto que en ambas existe parte de verdad. Así pues, decidí ofrecer a los lectores de mi libro una presentación equilibrada de un problema de interés general y sobre el que existe desacuerdo en el seno de la comunidad científica.»

Ahondé profundamente en el tema, continué, ya que deseaba comprender las razones y argumentos esgrimidos por ambas partes lo mejor que me fuera posible, con objeto de llegar a ser capaz de explicar por qué algunos científicos consideran que el oxígeno corre peligro, mientras otros opinan lo contrario. A lo largo de semanas estuve leyendo, resumiendo, calculando y comparando cifras y razones arguméntales, hasta que, por fin, un día, casi repentinamente, caí en la cuenta de que la preocupación, en relación al oxígeno, realmente se basaba en un error.

Por encima de todo existía la simple cuestión de comparación entre órdenes de magnitud; la cantidad total de carbono existente en todas las sustancias vivas y en descomposición, tanto en tierra firme como en el océano, viene a ser de unos 7 billones de toneladas, como máximo; en el supuesto de que por medio de la deforestación y polución oceánica fueran destruidos la mitad de todos los seres vivos, lo que ya representa una visión bastante pesimista, es decir, unos 3,5 billones de toneladas de carbono,

---

[52] Keller.

[53] J. H. RYTHER, *Nature, 221*, 374, 1970; BROECKER.

harían falta unos 9 billones de toneladas de oxígeno equivalentes para poder oxidarla; pero esto último es menos del 1 por 100 de los 1.200 billones de toneladas que en la actualidad existen en la atmósfera, y, por tanto, una cantidad tan pequeña que cabe considerar despreciable. Lo que en realidad ocurriría es que el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera, sin embargo, aumentaría exageradamente.

El segundo punto, también muy importante, era que cualquier reducción permanente de los organismos foto- sintéticos debe ir acompañada forzosamente de una correspondiente disminución del consumo biológico de oxígeno. Desde luego resulta posible que las plantas produzcan más hidratos de carbono del que en total utilizan para la respiración todos los animales y microorganismos. Esto conduce a un enriquecimiento en oxígeno de la atmósfera, que es un proceso que se desarrolló ya en la historia geológica de la Tierra. No obstante, es imposible que las criaturas que respiran consuman más hidratos de carbono del que produjeron; no pueden consumir mayor cantidad de oxígeno del que liberaron en la producción de los hidratos de carbono.

«Plantearse la cuestión de averiguar lo que ocurriría si fueran destruidas todas las plantas y, por tanto, se acabara la fotosíntesis, resulta únicamente de interés con vistas a modelos geológicos» —añadí—. Además, en cualquier caso, la población llegaría a morir pronto de hambre, en un mundo sin vegetación, mucho antes de que llegara a sufrir por la falta de oxígeno.

«Desde luego tales modelos existen —agregó el profesor SCHIDLOWSKI—. Cuando toda la vida sobre la Tierra haya terminado, el oxígeno será gradualmente consumido para ir oxidando al hierro y a los otros elementos que vayan quedando expuestos en virtud de los procesos de erosión. Según cálculos realizados por HOLLAND, este proceso duraría alrededor de unos tres millones de años, cifra que también fue utilizada por nuestro grupo en cálculos llevados a cabo sobre modelos [54]. En relación a las escalas temporales, en mi campo resultaría mejor decir *tan sólo* tres

[54] H. D. HOLLAND, *Ocean Waters Nutrients and Atmospheric Oxi- gen,* comunicaciones del Simposio sobre Hidrogeoquímica y Bioquímica, Washington, 1973, pág. 69. Véase también M. SCHIDLOWSKI, R. EICHMANN y J. JUNGE, *Precambrian Research, 2,* 1975, y en especial página 55. Según los cálculos con modelos hechos por GARRELS y col. *(American Scientist),* se requerirían unos doce millones de años para agotar todo el oxígeno en la atmósfera, a través de procesos geológicos.

millones de años, puesto que, en términos geológicos, esto corresponde a un intervalo de tiempo muy breve. De todas formas, debo admitir que tales procesos carecen de importancia para los que se preocupan acerca de los cambios ambientales que puedan tener lugar las próximas décadas o, incluso, siglos.»

«No obstante —proseguí—, subsiste la cuestión de que los procesos tecnológicos, biológicos o geológicos no pueden poner en peligro al oxígeno atmosférico, por lo menos por lo que se refiere a los próximos siglos o milenios. Por tanto, decidí, en relación con mi libro, no concentrar mi atención en el oxígeno, sino más bien en el dióxido de carbono, donde la situación resulta ser bastante más crítica.»

«Si puede servirle de algo —me hizo notar sonriendo el profesor SCHIDLOWSKI—, yo pasé por la misma experiencia. Inicialmente era geólogo, y cuando comencé a trabajar acerca de problemas atmosféricos también tuve la impresión que el oxígeno estaba en peligro. Nuestro director, el profesor JUNGE, que dirige el Departamento de Química del Aire, me dijo repetidamente que no era el oxígeno, sino el dióxido de carbono, el que probablemente iba a ocasionar dificultades; a pesar de ello tardé muchos meses en llegar a comprender claramente el asunto.»

«Y luego todo parece tan claro y evidente», hice notar, con la anuencia del profesor SCHIDLOWSKI.

«Pero no le he contado el final de la historia —añadí—, pues tras haber decidido sobre el nuevo enfoque que iba a dar a mi libro, y me empecé a concentrar en el problema del dióxido de carbono, leí el último trabajo de GARRELS, MACKENZIE y LERMAN, una copia del cual veo sobre su mesa [55]. Siguiendo la tesis de este trabajo, uno se da cuenta de que la deforestación, que venía preocupándome desde el principio, no determina únicamente un peligroso aumento de los niveles de dióxido de carbono atmosférico, sino que realmente, y debido al aumento de la erosión, ejerce notable impacto a largo plazo sobre el oxígeno atmosférico.»

«¿Y para hacer comprensibles para sus lectores todas estas relaciones mutuas, va a contarles usted un poco acerca de la historia de la atmósfera?»

«Efectivamente, y ésta es la razón por la que estoy aquí.»

---

[55] GARRELS y cols., *American Scientist.*

CAPÍTULO 2

La historia de la atmósfera

2.1. DIMENSIONES GENERALES

La atmósfera que rodea a nuestro planeta se extiende alrededor de unos 1.000 km, por encima de la superficie terrestre [56]; esta altura viene a ser ligeramente inferior a la sexta parte del radio terrestre, de modo que el volumen resulta ser alrededor de la mitad del de nuestro planeta. En cambio, la masa es despreciable frente a la de la Tierra: es tan sólo, aproximadamente, una millonésima parte de la de nuestro planeta. La masa total del agua terrestre, incluyendo la que se encuentra en forma de hielo, como en glaciares, etc., es unas doscientas cincuenta veces superior a la de la atmósfera. Estas proporciones, de 1 a 250 y a 1.000.000, convendrá recordárselas cuando consideremos la historia de nuestro planeta, cosa que vamos a hacer en los siguientes párrafos.

En las eras geológicas primitivas tanto la masa de la atmósfera como la de las aguas eran ciertamente inferiores a las actuales; por otra parte, la masa total de los gases que formaron parte de la atmósfera, pero que fueron perdiéndose a través de los procesos de formación de las rocas o por haber escapado hacia el espacio, era considerablemente superior a la masa que actualmente posee la atmósfera.

La mayor parte de la masa del aire, es decir, el 99,5 por 100, está concentrada en los 40 km inferiores de la atmósfera; el restante 0,5 por 100 queda distribuido entre los 960 km superiores. Las capas inferiores, en las que se desarrolla la formación de nubes y todos los demás fenómenos que constituyen lo que llamamos «tiempo», se conocen con el nombre de «troposfera»; se extiende hasta una altura de unos 10 a 12 km, en las latitudes medias, pero llega hasta los 18 km en los trópicos. Casi el 90 por 100 de la masa total del aire está concentrada en esta capa.

---

[56] En realidad, la densidad de la atmósfera va disminuyendo rápidamente, haciéndose cada vez más tenue, hasta confundirse con la zona gaseosa interestelar; a 100 km, por ejemplo (base de la termosfera y en plena ionosfera), la densidad de la atmósfera ya es tan sólo de 10^7, respecto a la que tiene el aire junto al suelo *(N. del T.)*.

Por encima de la troposfera, la capa que sigue se denomina «estratosfera»; en ella existen tan sólo vestigios de vapor de agua y virtualmente se encuentra libre de nubes; en esta región superior, que se extiende hasta unos 50 km por encima de la superficie terrestre, se encuentra la capa de ozono; el origen de este «escudo» que es de importancia esencial para la vida sobre la Tierra será discutido más adelante en detalle.

Para la capa atmosférica situada por encima de la estratosfera se utilizan distintos nombres, según el punto de vista científico adoptado; por lo general, se habla de «ionosfera», queriendo con ello indicar que existen allí partículas con carga eléctrica (ionizadas) en el seno de un gas muy enrarecido; algunas subcapas de la ionosfera reflejan las ondas electromagnéticas, por lo que son de gran importancia en las radiocomunicaciones.

La densidad de la atmósfera disminuye rápidamente con la altura; más allá de la estratosfera, la presión del aire alcanza valores que, en un laboratorio terrestre, serían razonablemente considerados como el vacío. No existe una clara separación entre la atmósfera y el espacio, y este último tampoco se encuentra totalmente vacío, pues entre ambos se establece una gradual transición. A unos 1.000 km de altura, los gases ligeros, tales como el hidrógeno y el helio, son capaces de escapar hacia el espacio; por otra parte, se registra una permanente penetración de flujo de materia, procedente de lo que se denomina «viento solar», constituido principalmente por protones (núcleos de átomos de hidrógeno), así como materia que procede de los meteoritos. La relación cuantitativa, entre ganancias y pérdidas, en tales procesos, no se conoce con precisión, aunque en general se acepta que desde la formación de la Tierra ha venido prevaleciendo en nuestro planeta la pérdida.

La capacidad de un planeta para construir su propia atmósfera estable depende de su masa y temperatura; cuanto mayor sea su masa, más intenso es su campo gravitatorio, y, por tanto, mayores también las fuerzas atractivas que actúan sobre las partículas gaseosas; cuanto más elevada es la temperatura, más rápidos son los movimientos de agitación de las partículas gaseosas, y, por tanto, mayor la probabilidad de que logren escapar hacia el espacio. Para las condiciones de temperatura que se registran en los planetas más internos del sistema solar, el campo gravitatorio de un planeta tal como la Tierra no es suficiente para poder retener a los gases

más ligeros (hidrógeno, helio), mientras que en Júpiter, que es considerablemente mayor y más distante del Sol (más frío), las pérdidas se limitan a pequeñísimas cantidades de hidrógeno.

Los pequeños planetas (planetoides) que orbitan alrededor del Sol, principalmente entre Marte y Júpiter, así como los meteoritos, carecen de atmósfera, debido a que su campo gravitatorio es demasiado débil; todo lo más, consiguen retener entre los poros de sus rocas, en el interior de tales cuerpos, vestigios de compuestos líquidos o gaseosos, aunque, finalmente, tales restos se evaporan tan pronto como dichos cuerpos se acercan al Sol, lo que determina que se eleve su temperatura.

2.2. LO QUE PUEDE REVELARNOS LA ATMOSFERA ACERCA DEL ORIGEN DE LA TIERRA

La edad de nuestro planeta se calcula en unos 4,6 miles de millones de años. Ya no se acepta, prácticamente, la idea de que se originó a partir de una primitiva masa líquida esférica e incandescente. Durante las últimas décadas, los científicos llegaron a la conclusión de que nuestro planeta se formó a partir de un conglomerado de pequeños planetoides y meteoritos; la evidencia circunstancial de tal proceso no fue facilitada por los astrónomos, sino por expertos en química geológica y del cosmos [57], y la pieza argumental de mayor evidencia es la propia composición de nuestra atmósfera. El razonamiento parte del hecho inicial de que la composición de la Tierra difiere considerablemente de la bien conocida distribución de los elementos químicos en el sistema solar y el universo. Nuestro sistema solar consta de casi un 90 por 100 de hidrógeno, un 9 por 100 del gas noble helio, y tan sólo un 1 por 100 del resto de todos los otros noventa elementos químicos existentes combinados. Fácilmente puede explicarse la razón por la que la Tierra contiene mucho menos hidrógeno y helio y considerablemente mayor cantidad de los otros elementos, ya que, como se decía en el apartado anterior, su campo gravitatorio es sencillamente demasiado débil para poder retener a tales gases ligeros.

---

[57] Véase, por ejemplo, H. E. SUESS, *Journal of Geology, 57,* 600, 1949; véase también H. BROWN, en: G. P. KUIPER (ed.), *The Atmospheres of the Earth and the Planets,* Chicago, 1949.

Además del hidrógeno y el helio existen otros elementos químicos, y en especial los otros gases nobles, que son mucho más raros sobre la Tierra que en cualquier otra parte del universo. Si nuestro planeta se hubiera formado globalmente y en su totalidad, las abundancias de neón, criptón y xenón tendrían que ser mayores, en un factor de millones o miles de millones, que las que encontramos en la actualidad. Tales gases, en contra de lo que sucede con el helio, son tan pesados que sólo pueden haber escapado hacia el espacio en cantidades despreciables; por otra parte, puesto que son inertes, no pueden haberse perdido a través de procesos químicos; tampoco son radiactivos, de modo que no se transformaron en otros elementos. Por tanto, si hubieran estado presentes cuando la Tierra se formó subsistirían actualmente en la atmósfera.

De hecho, encontramos tan sólo al gas noble argón en cantidad apreciable, pero casi exclusivamente en su forma isotópica de peso atómico 40; este isótopo, no obstante, no es un componente original de la atmósfera, pues se ha ido formando a partir de la desintegración radiactiva del potasio, y se fue acumulando gradualmente en la atmósfera, a lo largo de las eras geológicas. Su concentración actual es la que corresponde cabría esperar de la abundancia del potasio radiactivo en la Tierra. En consecuencia, el argón no está relacionado a nuestra evidencia circunstancial, en relación a los gases presentes cuando nació la Tierra.

Así pues, si no tenemos en cuenta el argón, en la atmósfera de la Tierra existen tan sólo trazas de gases nobles, tal como sucede en planetoides o meteoritos. En consecuencia, parece lógica la explicación de que nuestro planeta se formó originalmente y en gran parte a partir de la conglomeración de pequeños planetas y meteoritos, privados ya de la mayor parte de sus componentes gaseosos, incluyendo el hidrógeno. Análogamente, cabe pensar que, en virtud de procesos cósmicos desconocidos, tales elementos ya habían quedado diluidos en aquellas regiones de la nube cósmica gaseosa, a partir de la cual, y en la vecindad del Sol, se formaron Venus, la Tierra, Marte, planetoides y meteoritos. En caso de que ambos razonamientos resulten correctos, lo más probable es que nuestro planeta, al nacer, estuviera desprovisto, o casi desprovisto, de una envoltura gaseosa primaria. De acuerdo con esta interpretación, nuestra atmósfera debe haber

venido formándose, desde aquel tiempo, a partir de gases emanados desde el interior de la Tierra [58].

2.3. LOS ANTECESORES DE NUESTRA ATMOSFERA

Los cuerpos celestes contienen ciertas cantidades de elementos radiactivos, y la energía producida por estos elementos suministra un eficiente calentamiento interior. En un pequeño meteorito, tal calor llega con rapidez a la superficie, por conducción, y a continuación es radiado hacia el espacio, pero, en cambio, un cuerpo grande se autoaísla más efectivamente, de modo que su interior resulta estar mucho más caliente que su superficie. Cuando se formó la Tierra, como un conglomerado de pequeños cuerpos, se produjo un tremendo calentamiento interior en el seno del recién formado planeta, como consecuencia de tales procesos, así como de efectos gravitacionales; en consecuencia, se iniciaron muchas reacciones químicas, algunos de cuyos productos eran gaseosos. En primer lugar, el agua, captada químicamente en forma de agua de cristalización, fue liberada en virtud de dicho proceso de calentamiento; este vapor de agua y otros productos gaseosos han venido siendo emitidos desde el interior de la Tierra desde entonces, en virtud de erupciones volcánicas y otros procesos desgasificadores; constituyen la materia prima a partir de la cual se fue formando la envoltura gaseosa y acuosa de nuestro planeta.

Como la radiactividad va disminuyendo gradualmente, cabe suponer que en los períodos geológicos primitivos el interior de la Tierra estuvo más caliente de lo que está en la actualidad; por tanto, las erupciones volcánicas y efluvios gaseosos también es probable que fueran más intensos y frecuentes de lo que son hoy día. Así, es de suponer que la atmósfera inicial se formó de forma relativamente rápida a partir del instante en que lo hizo el planeta; su composición era la de los gases volcánicos que, a su vez, estaría determinada por la naturaleza de las rocas fundidas en el interior de la Tierra.

---

[58] Véase M. SCHIDLOWSKI, en: B. F. WINDLEY (ed.), *The Early History of the Earth*, Wiley, Londres, 1976, págs. 525-35; véase también J. C. G. WALKER, *ibíd.*, págs. 537 46; M. SCHIDLOWSKT, *Origin of Life*, Proceedings of 2nd ISOOL conference, Center. Acad. Publ. Japan, Tokyo, 1978, págs. 3-20.

La composición actual de los gases volcánicos es bien conocida, tal como se resume en la siguiente tabla, sin que exista evidencia de ningún cambio esencial de dicha composición durante el transcurso de los pasados tres o cuatro mil millones de años. Diversos científicos, no obstante, sostienen la opinión de que en los primerísimos tiempos de la historia de la Tierra tal composición pudo ser distinta; desde luego, los gases volcánicos no contienen en la actualidad oxígeno libre, siendo, en cambio, compuestos totalmente oxidados, tales como el vapor de agua y el dióxido de carbono. Si en los tiempos iniciales las rocas fundidas cerca de la superficie terrestre contenían más hierro libre, u otras sustancias con alta afinidad para el oxígeno, los productos gaseosos emitidos pudieron contener asimismo una fracción inferior de compuestos totalmente oxidados. Por otra parte, también es probable que fuera emitida *mayor* cantidad de hidrógeno libre y compuestos de hidrógeno y carbono (metano), azufre (sulfuro de hidrógeno) y nitrógeno (amoníaco). Tal medio ambiente, más rico en hidrógeno y deficitario en oxígeno, es lo que, según los científicos, se clasifica como un medio «reductor». El término «mayor» utilizado en relación al hidrógeno y sus productos debe ser entendido en forma relativa. El contenido atmosférico de metano e hidrógeno se mide actualmente en partes por millón (véase la tabla 1). Si en la atmósfera primitiva la abundancia de las sustancias reductoras era tan sólo análoga a la del dióxido de carbono, en la atmósfera actual, es decir, de varias centésimas por ciento esto pudo haber tenido gran importancia en varios procesos geoquímicos y, desde luego, para el propio origen de la vida misma.

Realmente, una atmósfera de este tipo, ligeramente reductora, pudo probablemente haber existido durante un «corto» período, es decir, algunas centenas de millones de años. Tanto el hidrógeno libre como el que resulta liberado de los compuestos hidrogenados bajo la actuación de la radiación ultravioleta solar (denominada fotolisis), escaparon hacia el espacio. Las emisiones gaseosas de hidrógeno y compuestos hidrogenados fueron decreciendo a medida que la composición de las rocas fundidas cerca de la superficie, y, por tanto, la propia de los gases volcánicos, fueron aproximándose gradualmente a las condiciones actuales; así pues, hace ya unos tres y medio o cuatro mil millones de años, parece probable que se desarrollara una atmósfera «neutra» (es decir, ni reductora ni oxidante), y

cuyos componentes principales serían el vapor de agua, el dióxido de carbono, el nitrógeno y el argón [59].

TABLA 3
Composición promedia de los gases volcánicos [60]

Componente principal	*Productos químicos relacionados*	*Porcentaje*
Vapor de agua (H_2O)	Hidrógeno (H_2)	80
Dióxido de carbono (CO_2)	Monóxido de carbono, metano (CH_4)	12
Anhídrido sulfuroso (SO_2)	Azufre (S_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S)	7
Nitrógeno (N_2)	Amoníaco (NH_3)	1

Además, existen pequeñas cantidades de ácido clorhídrico (HC1), fluorhídrico (HF), argón (A) y helio (He), aunque este último resulta producto de la desintegración radiactiva del uranio y el torio. A diferencia del argón, el gas helio, que es muy ligero, no permanece ni se va acumulando en la atmósfera, sino que se difunde hacia arriba y, por último, escapa hacia el espacio.

Gran parte del vapor de agua se condensó de forma gradual, para dar lugar a la envoltura de agua líquida de nuestro planeta (la hidrosfera), que es única en todo el sistema solar. Nuestro «planeta azul» merece este nombre por encontrarse justamente a la distancia correcta del Sol; en consecuencia, nuestras condiciones ambientales son fundamentalmente distintas de las que existen en el resto de los planetas vecinos; la superficie de Venus, que se encuentra más cerca del Sol, está demasiado caliente para que pueda existir agua en estado líquido, mientras que en Marte, situado a mayor distancia, tampoco puede existir, porque las temperaturas son demasiado bajas.

Con la formación de la hidrosfera, la Tierra adquirió un disolvente ideal en el que los componentes de la atmósfera podían entrar a reaccionar con los minerales de la corteza; en particular, la mayor parte del dióxido de carbono, emanado desde el interior de la Tierra, se disolvió en los océanos, con la consiguiente formación de carbonatos, tales como la caliza; según ha demostrado el Premio Nobel americano HAROLD C. UREY, este

[59] Según H. D. HOLLAND, en: P. J. BRANCAZIO y A. G. W. CAMERON (eds.), *The Origin and Evolution of Atmospheres and Oceans*, Wiley, Nueva York, 1964, pág. 93.

[60] HOLLAND, pág. 96.

proceso resulta de primordial importancia para la composición de nuestra atmósfera. Como existe una enorme cantidad de agua sobre la Tierra, el dióxido de carbono puede reaccionar con los minerales de la corteza, de modo que, a la larga, *no cabe la posibilidad de que el dióxido de carbono atmosférico vaya acumulándose hasta alcanzar niveles de concentración superiores a los que existen en la actualidad* [61]. Sin embargo, algunos procesos, tales como el intercambio gaseoso entre la atmósfera y los océanos, mezclas oceánicas y reacciones con material de la corteza, no requieren gran cantidad de tiempo; por tanto, a escala de tiempos corta, frente a las geológicas, y concretamente para intervalos de tiempo de siglos o milenios, cabe la posibilidad de que un incremento de la producción de dióxido de carbono sea capaz de ocasionar un aumento en los niveles de concentración de dicho gas en nuestra atmósfera.

Entre los otros gases que también emanaron del interior de la Tierra, el anhídrido sulfuroso y los ácidos clorhídricos y fluorhídrico quedaron casi completamente disueltos en los océanos; de esta forma se formaron minerales tanto solubles (sal marina), como insolubles; el nitrógeno, aunque sólo constituye una ínfima parte de los gases volcánicos, se fue acumulando gradualmente en la atmósfera y en virtud de su baja reactividad, bajo las condiciones existentes, no se disolvió en los océanos y llegó a ser el principal componente de la atmósfera; el gas noble argón que también es emanado, aunque en cantidades mucho menores, se acumuló asimismo; no obstante, el oxígeno, que es el segundo componente de nuestro aire, no llegó, desde luego, a nuestra atmósfera de la misma forma.

2.4. «AIRE» DESPROVISTO DE OXIGENO

Muchos detalles relativos a los primeros tiempos de la historia de nuestra atmósfera, de la que en el apartado anterior se dio una visión superficial, siguen siendo poco claros y controvertidos, aunque es verdad que acerca de un punto concreto existe considerable acuerdo: *Hasta hace unos dos mil millones de años la atmósfera de nuestro planeta no contuvo ninguna cantidad apreciable de oxígeno libre,* conclusión a la que han llegado

[61] H. C. UREY, *The Planets: Their Origin and Development,* Yale University Press, New Haven, 1953, pág. 148.

científicos de distintas especialidades, a través de diversos esfuerzos de investigación independientes entre sí.

Los primeros en conseguir una prueba o evidencia de tal afirmación fueron los geólogos, ya que los viejos sedimentos que no estuvieron expuestos a la atmósfera durante los últimos dos mil millones de años contienen grandes cantidades de minerales que no resultan estables, bajo las actuales condiciones de la atmósfera; especialmente la pirita (FeS_2), un cristal amarillo cobrizo que se destruye en muy pocos años, formando óxido férrico y anhídrido sulfuroso, en contacto con el aire. Los famosos depósitos de oro Witwatersrand, en África del Sur, están constituidos por muchas capas horizontales de gravas solidificadas y arenas, hasta unos 6 km de profundidad; además de su componente principal, el cuarzo, tales arenas contienen también muchas inclusiones de piritas; los cristales encontrados en los depósitos parecen haber sido redondeados por la acción del viento y del agua, de modo que lo más probable es que hubieran estado expuestos a la atmósfera, durante un cierto tiempo, antes de quedar depositados y sepultados hace unos dos o tres mil millones de años; sin embargo, no presentan la menor indicación de haber sufrido procesos de oxidación. Vetas con granos de oro y pecblenda se encuentran en el fondo de las capas sedimentadas, dado que se trata de partículas pesadas; la pecblenda es un mineral que también se oxida en contacto con la atmósfera. Depósitos similares a los de Witwatersrand también se encuentran en Canadá y Brasil. En vista de la amplia distribución de las formaciones de este tipo, del espesor que tienen sus depósitos y del hecho de que siempre contengan también otros materiales oxidables, hay que excluir la posibilidad de que se dieran unas condiciones accidentales de localización; esto condujo al decano de la mineralogía alemana, P. RAMDOHR, ya en el año 1958, y a pesar de las dudas mantenidas por otros geólogos, a la conclusión de que la atmósfera de la Tierra no contenía oxígeno cuando se formaron tales sedimentos [62].

Por otra parte, las pruebas, sin lugar a dudas, de que ya existía oxígeno en la atmósfera, se encuentran tan sólo en sedimentos cuya edad es inferior a los 18.000 millones de años; en tal sentido cabe mencionar en especial a

[62] P. RAMDOHR, Abhdlg. Deutsche Akad. d. Wiss. Berlín 1958, Kl. Chemie, Geologie und Biologie, 3, 1; véase también M. G. RUTTEN, The Geological Aspects of the Origin of Life on Earth, Elsevier, Amsterdam, 1962, pág. 96.

los «lechos rojizos» (rocas sedimentarias formadas por arena, generalmente de cuarzo, en forma de conglomerados y esquistos) cuyo color mohoso, herrumbroso, es debido a agregados de óxido férrico; no existen muestras de hierro «rojo», o completamente oxidado, en sedimentos continentales de mayor antigüedad [63].

Aunque en 1958 la afirmación de que hace dos mil millones de años la atmósfera terrestre carecía de oxígeno era considerada por varios geólogos una hipótesis herética, la misma idea no resultaba sorprendente para los científicos que trabajaban en otros campos de actividad, y en especial aquellos que se dedicaban a la investigación de la evolución planetaria y el origen de la vida veían así confirmadas sus hipótesis y sus teorías; algunas de estas últimas, en realidad, habían sido ya publicadas mucho antes. Resultaría realmente difícil de explicar por qué tendría que haber existido una atmósfera oxidante, desde el principio, sobre la Tierra, dado que en nuestros planetas vecinos apenas existe la menor cantidad de oxígeno libre. Además, si el oxígeno no fuera constantemente repuesto desaparecería rápidamente de la atmósfera; por ser muy reactivo, interaccionaría con los minerales de la corteza. El oxígeno, desde luego, no podría haber escapado del interior de la Tierra, en virtud de su rápida capacidad de interacción con otros elementos químicos; en consecuencia, se plantea la cuestión de averiguar de dónde procede el oxígeno libre.

Mientras no existieron plantas verdes, el único proceso que pudo ser responsable de la producción de oxígeno es la disociación del vapor de agua, bajo la acción de la radiación ultravioleta. Tal proceso, denominado «fotolisis», tiene lugar a grandes alturas donde las densidades atmosféricas son ya lo suficientemente bajas, para que los átomos de hidrógeno liberados escapen hacia el espacio, antes de entrar en colisión con otros de oxígeno, para dar lugar a la nueva formación de moléculas de agua. Los restantes átomos de oxígeno que, por decirlo sencillamente, son incapaces de encontrar «compañía», se van acumulando en la atmósfera. El científico americano H. C. UREY, cuyas ideas sobre la evolución planetaria hemos seguido en el capítulo anterior, demuestra, sin embargo, que esta producción de oxígeno a través del proceso de fotolisis, en realidad es autolimi-

[63] RUTTEN, págs. 97 y 109; P. CLOUD y A. GIBOR, *Scientific American*, septiembre, 1970, pág. 111.

tado, dado que el oxígeno libre es opaco a la radiación ultravioleta y, exactamente, para las mismas longitudes de onda que son responsables de la disociación del vapor de agua; en consecuencia, cuando una cierta cantidad de oxígeno llega a formarse en la alta atmósfera, el vapor de agua situado por debajo queda protegido frente a la radiación que podría producir su ulterior fotodisociación. La cuestión de decidir si el oxígeno producido en virtud de la fotolisis puede, o no, acumularse en las capas atmosféricas situadas en la proximidad del suelo es un tema sometido a controversia; en caso de que la respuesta sea positiva, tal acumulación debería haber sido tan sólo en forma de vestigios de tal gas. L. V. BERKNER y L. C. MARSHALL, valorando las consecuencias de este «efecto-Urey», encontraron que por lo menos una milésima parte del oxígeno actualmente presente en la atmósfera podría haberse originado a partir de fotolisis [64]. Por contra, el físico americano R. T. BRINKMANN es de la opinión de que hasta un 25 por 100 del oxígeno presente en la atmósfera podría haber sido producido por fotolisis; sin embargo, admite que esta hipótesis está en conflicto con hechos geológicos y biológicos bien conocidos, y especula que bien pudiera ocurrir que el oxígeno liberado en la fotolisis sufra reacciones químicas en el seno de la alta atmósfera (y en particular con hidrógeno, que puede ser aportado arrastrado por el «viento solar»), por lo que no llega a alcanzar las capas atmosféricas más próximas a la superficie terrestre [65]. El hecho de que prácticamente no se encuentre oxígeno en las atmósferas de Venus y Marte es otro argumento en contra del supuesto de que la fotolisis es el mecanismo dominante en la producción de tal elemento químico en la atmósfera terrestre.

Finalmente, biólogos y bioquímicos llegaron a la conclusión de que la vida debe de haberse originado en un ambiente desprovisto de oxígeno libre, ya que de otro modo hubiera sido imposible la síntesis de sustancias químicas, cada vez más complejas, dado que, incluso las más sencillas estructuras de sustancia viva hubieran sido finalmente «quemadas», es decir, oxidadas. De hecho, el metabolismo de los organismos más primitivos nos indica también que tales organismos deben de haberse originado cuando

---

[64] Véase L. V. BERKNER y L. C. MARSHALL, en: BRANCAZIO y CAMERON (eds.), pág. 112.

[65] R. T. BRINKMANN, Journal of Geophysical Research, 74, 5355, 1969.

no existía oxígeno en su ambiente; estos organismos anaeróbicos (que evitan la presencia de oxígeno) son incapaces de medrar bajo las condiciones atmosféricas actuales; para hacer frente a sus necesidades energéticas recurren a la fermentación. Además, únicamente en una atmósfera desprovista de oxígeno pueden darse las condiciones de «clima radiativo» indispensables para el origen de la vida [66]. Aunque para comprender esto último tendremos que explicar antes las relaciones existentes entre la composición de la atmósfera y la radiación que penetra hasta la superficie de la Tierra.

2.5. LAS «DIVISAS» COMPONENTES DE LA RADIACION Y LOS «DERECHOS ADUANEROS» DE LA ATMOSFERA

El Sol es, indiscutiblemente, el foco más importante de energía para nuestro planeta; su espectro de radiación es muy amplio, ya que se extiende desde los rayos X, cuyas longitudes de onda son del orden de la millonésima de milímetro (es decir, 10^{-9} m), a través de la zona ultravioleta y de luz visible, seguidas de las radiaciones infrarrojas y microondas, hasta las ondas radioeléctricas, o de la radiodifusión, cuyas longitudes de onda llegan a ser de varios kilómetros. Para cada cuerpo que irradia energía, la distribución de ésta a lo largo del espectro viene determinada por la temperatura del emisor; cuanto más caliente se encuentre, tanto más desplazada hacia las cortas longitudes de onda se encuentra la zona correspondiente al máximo de su emisión. El Sol, cuya temperatura superficial de emisión es de unos 5.500°C, presenta su máximo flujo de radiación en la zona de la radiación visible, con flujos de radiación decrecientes hacia ambos extremos del espectro.

La energía radiada es transmitida en minúsculas e indivisibles unidades de energía que reciben el nombre de «cuanta»; para cada longitud de onda, cada «cuanto» tiene un valor bien determinado que decrece al ir aumentando la longitud de onda. En sentido metafórico cabría decir que cada longitud de onda sólo puede llevar su contribución energética individual en su propia «divisa energética». Así pues, los rayos X, de corta longitud de onda, pueden traficar en libras esterlinas; la radiación ultravioleta, en

[66] Véase M. SCHIDLOWSKI, en: WINDLEY (ed.), pág. 525.

dólares; la luz visible, en marcos alemanes; la radiación infrarroja, en chelines austríacos, y la emisión radioeléctrica, en liras italianas; en tal sentido podríamos decir que el Sol gasta la mayor parte de su dinero en forma de marcos, y luego, en orden decreciente, en dólares, chelines, libras y liras. Desde luego, todo esto no es más que una mera y aproximada imagen, pues de hecho no tan sólo cada región espectral tiene su propia divisa, tal como la luz visible, sino que lo mismo ocurre con cada longitud de onda individual.

Para iniciar procesos físicos o químicos es preciso aportar no tan sólo una determinada cantidad de energía, sino que también resulta necesario que tal aportación sea abonada en una determinada moneda específica; en otras palabras, no es tan sólo importante que la radiación solar (y, por tanto, la energía) penetre hasta la superficie terrestre, sino también conocer a qué región espectral va asociada tal radiación.

Todos los componentes de la atmósfera difieren por su transparencia de las radiaciones de distinta longitud de onda; siguiendo la analogía de las «divisas», podríamos decir que cada componente atmosférico exige sus propios derechos arancelarios o de aduana, según cual fuere el tipo de moneda que transita; el dióxido de carbono, por ejemplo, permite que pasen casi libremente marcos y dólares (luz visible y ultravioleta), pero en cambio exige derechos considerables para el tránsito de chelines (radiación infrarroja). Aunque la abundancia actual del dióxido de carbono atmosférico es tan sólo del 0,03 por 100, el hecho anterior tiene un efecto considerable. El ardiente Sol irradia, como ya hemos citado, la mayor parte de su energía en forma de luz visible, y ésta es capaz de pasar a través de los distintos gases que constituyen la atmósfera casi sin sufrir atenuación; pero la Tierra, que se encuentra mucho más fría, emite la mayor parte de su radiación en longitudes de onda más largas, es decir, en forma de radiación infrarroja, la cual es parcialmente absorbida por el dióxido de carbono. De esto resulta que si no existiera dióxido de carbono en la atmósfera, la superficie terrestre se enfriaría rápidamente durante la noche. Por tanto, las variaciones en el contenido del dióxido de carbono atmosférico es muy probable que determinen efectos de retroalimentación en la radiación y balance energético de nuestro planeta.

También otros componentes de la atmósfera, y no tan sólo el dióxido de carbono, resultan ser más o menos transparentes para la radiación visible. Únicamente el vapor de agua, y en especial el agua condensada en

forma de gotitas (nubes, niebla) y el polvo atmosférico que surge a consecuencia de las tormentas, erupciones volcánicas, así como de las actividades humanas, exigen ciertos derechos arancelarios en dicha zona del espectro. El vapor de agua absorbe también fuertemente en el infra- rojo, lo que explica el más intenso enfriamiento radiactivo que se registra durante las noches de cielo claro y despejado, frente a aquellas en que el cielo se mantiene cubierto o encapotado.

Los rayos X y la radiación ultravioleta, con longitudes de onda inferior a los 100 nanómetros, resultan absorbidos en las tenues capas de la atmósfera superior, por lo que apenas llegan a penetrar hasta por debajo de los 50 km de altura; estas radiaciones son tan altamente energéticas que resultan capaces de arrancar electrones de la corteza atómica de los átomos que constituyen los gases atmosféricos; en consecuencia, cuando la radiación es absorbida, los átomos quedan ionizados (con carga eléctrica), y por esta razón la capa más externa de la atmósfera, donde se desarrollan tales procesos, se denomina ionosfera.

La radiación ultravioleta, entre los 100 y 200 nanómetros de longitud de onda, es absorbida en su mayor parte por las moléculas de oxígeno en las capas superiores de la estratosfera; en tales procesos, las moléculas de oxígeno se fragmentan en átomos sencillos, la mayor parte de los cuales vuelven a recombinarse entre sí para formar nuevas moléculas de oxígeno, especialmente durante la noche, en ausencia de la radiación solar; algunos átomos reaccionan con las moléculas de oxígeno (O_2), en cambio, para dar lugar a la formación del ozono (O_3), que es una forma triatómica de oxígeno, tales átomos deben unirse a moléculas de oxígeno. El ozono, por su parte, absorbe fuertemente la radiación ultravioleta de longitudes de onda comprendidas entre 200 y 300 nanómetros, y al hacerlo se descompone para dar lugar a moléculas diatómicas normales de oxígeno y a átomos aislados del mismo gas. Además, los átomos de oxígeno pueden reaccionar con el ozono, para producir dos moléculas de oxígeno ($O + O_3 = 2\ O_2$). El ozono también puede resultar descompuesto a través de reacciones químicas con diversos vestigios gaseosos que existen en la atmósfera, y como resultado de todo ello se forma una cadena, o sistema químico complejo, gracias al que el ozono se está produciendo en forma continua a la vez que se va descomponiendo; el equilibrio resultante da lugar a que de 20 a 50 millonésimas partes de oxígeno existente en la estratosfera se encuentren

en forma de ozono. Sin embargo, esta minúscula cantidad resulta suficiente para absorber totalmente la radiación solar ultravioleta, de longitud de onda comprendida entre los 200 y casi 300 nanómetros.

Tal absorción de energía radiante tiene por efecto inmediato determinar un eficiente calentamiento de la estratosfera; mientras la temperatura de la troposfera va disminuyendo con la altura, a un ritmo de unos 6°C por kilómetro, para alcanzar una temperatura de unos –60°C junto la base de la estratosfera, en el seno de esta última la temperatura vuelve de nuevo a aumentar, de modo que a unos 50 km de altura, límite superior de la estratosfera, la temperatura llega a ser, nuevamente, de unos 0°C, lo que equivale a decir que vuelven a registrarse temperaturas análogas a las existentes en la superficie de la Tierra. Tal distribución de temperaturas, dentro de la estratosfera, es la razón de la tremenda estabilidad vertical que se registra en su seno, donde, por tanto, no existen los movimientos convectivos y, virtualmente, no se produce la formación de nubes. El intercambio gaseoso entre la estratosfera y las capas troposféricas inmediatas resulta tan débil que el tiempo de residencia de las partículas de polvo inyectadas en la estratosfera (por ejemplo, debido a fuertes erupciones volcánicas) resulta ser mucho mayor que en la troposfera, donde la circulación vertical y las precipitaciones facilitan que se produzca un eficiente «barrido» de cualquier material vertido en ella.

La capa de ozono atmosférico protege a los seres vivos, en la superficie terrestre, de la radiación, que resultaría letal, ya que la luz ultravioleta, de longitud de onda comprendida entre los 260 y 290 nanómetros, es capaz de descomponer los componentes más importantes de las sustancias vivas y, concretamente, la proteína y los ácidos nucleicos. Desde luego, esta peligrosa radiación es incapaz de penetrar profundamente dentro de un organismo multicelular, pues una capa protectora o una gruesa piel les proporcionan una adecuada protección. Sin embargo, para la piel humana una fuerte dosis produce cáncer, y también las hojas de las plantas pueden sufrir daños. Desde luego, los organismos microscópicos unicelulares, que surgen como primeras formas de vida, son los que pueden sufrir mayores riesgos, ya que para ellos la radiación ultravioleta, al perturbar seriamente sus procesos metabólicos y de división celular, acaba significando la muerte. Esta es la razón por la cual tal forma de radiación suele, en general, ser utilizada con fines de esterilización.

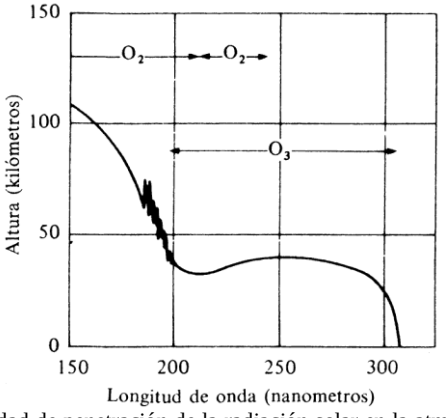


FIG. 6, *a*. Profundidad de penetración de la radiación solar en la atmósfera terrestre; la curva nos muestra la altura a la que la radiación solar queda reducida a una tercera parte de la intensidad extraterrestre (exactamente, reducida a l/*e* = 36,8 por 100; *e* es la base de logaritmos neperianos o naturales). La radiación solar de longitudes de onda inferiores a los 295 nanómetros no llega hasta la superficie terrestre; la radiación de longitudes de onda inferior a los 200 nanómetros es absorbida en gran parte por las moléculas de oxígeno (O_2), mientras que las longitudes de onda comprendidas entre los 200 y 300 nanómetros resultan atenuadas predominantemente por el ozono (O_3).

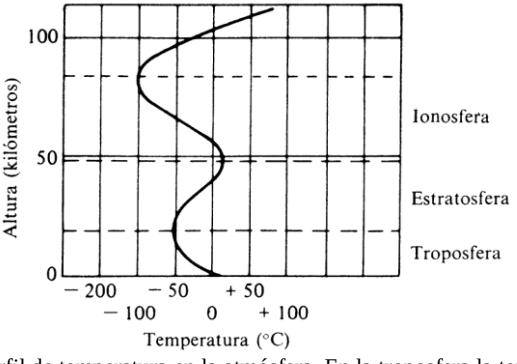


FIG. 6, *b*. El perfil de temperatura en la atmósfera. En la troposfera la temperatura disminuye a medida que aumenta la altura; en la estratosfera comienza a aumentar de nuevo hasta alcanzar otra vez una temperatura máxima, alrededor de los 50 kilómetros, para luego volver a disminuir. Por encima de los 80 kilómetros se observa un tremendo aumento de temperatura, aunque, en virtud de las bajas densidades gaseosas allí existentes, la «temperatura» tiene un sentido distinto del que estamos acostumbrados.

En consecuencia, en tanto que en la atmósfera no existió oxígeno libre, y, por tanto, tampoco había ozono, no eran tan sólo las condiciones químicas las que diferían de las de nuestro ambiente actual, sino también el clima de radiación; en tales condiciones era imposible la existencia de vida sobre las superficies terrestres; únicamente bajo unos pocos metros de agua podría haber sido posible la vida, puesto que el agua exige altos derechos arancelarios en dólares, para el paso de la peligrosa radiación ultravioleta. Por otra parte, era precisamente la energía de estos dólares-ultravioleta la que proporcionaba la importante acumulación de capital energético, indispensable para una variedad de reacciones químicas necesarias para el origen de la vida.

2.6. ¿VIDA POR AZAR?

El hecho de que la Tierra orbite alrededor del Sol, justamente a la distancia precisa para que pueda existir agua en forma líquida, resulta ser el hecho accidental más importante en relación al origen de la vida. La cuestión de saber si la vida hubiera sido posible o no en un medio ambiente basado en condiciones bioquímicas totalmente distintas, digamos, por ejemplo, con amoníaco líquido como disolvente, resulta ser un tema puramente especulativo.

Fueron el bioquímico soviético ALEXANDER I. OPARIN y el biólogo y genético británico J. B. S. HALDANE quienes, en el intervalo comprendido entre las dos últimas guerras mundiales, presentaron una teoría acerca de cómo pudo haberse desarrollado la vida terrestre en presencia de agua y en una atmósfera reductora (o por lo menos no oxidante) [67]. En 1953 dicha teoría fue confirmada experimentalmente por S. L. MILLER, un joven americano que disfrutaba de una beca para investigación a llevar a cabo con H. C. UREY. Purante una semana, MILLER mantuvo una mezcla de metano, vapor de agua, amoníaco e hidrógeno, que fueron, probablemente, los componentes de una primitiva atmósfera reductora, en circulación en el interior de una ampolla de vidrio sellada que permanentemente estaba expuesta a descargas eléctricas. El análisis de las sustancias que se formaban

[67] A. I. OPARIN, *The Origin of Life,* Macmillan, Nueva York, 1938. OPARIN empezó a ocuparse de este tema en 1924; véase también J. B. S. HALDANE, *The Origin of Life,* Harper, Nueva York, 1933.

en tal experiencia condujo a resultados sensacionales, ya que MILLER encontró bloques estructurales importantes para la vida, y en particular aminoácidos [68].

Durante los años siguientes, UREY y MILLER, así como un gran número de otros científicos, repitieron la misma experiencia bajo diversas condiciones de experimentación; se ensayaron distintas posibles composiciones de la «atmósfera» y diversas fuentes energéticas; además de las descargas eléctricas, simuladoras de las tormentas, se ensayaron también la radiación ultravioleta y la radiactividad; la primera porque fue ella, seguramente, la que suministró la mayor parte de la energía en la primitiva atmósfera inicial, y la segunda para simular la existencia de materiales radiactivos que se encuentran en la corteza terrestre [69]. Los resultados de todas estas experiencias demostraron, sin duda, que bajo las condiciones que probablemente se dieron hace varios miles de millones de años, pudieron formarse de manera análoga, todos los componentes importantes de la sustancia orgánica.

Tales bloques estructurales, disueltos en agua, reaccionaron entre sí, y allí, protegidos contra el peligro de su destrucción por la radiación ultravioleta, pudieron formarse macromoléculas conteniendo centenas y miles de átomos. Algunos minerales, como la arcilla, la lava o la tierra silícea, pudieron actuar de sustancias portadoras e intercambiadoras iónicas. Finalmente, por acumulación de tales macromoléculas en el agua, surgiría un agente, al que los científicos comúnmente conocen con el nombre de «sopa primitiva». En condiciones favorables, como en aguas poco profundas tierra adentro o lagunas cerradas o con escaso intercambio de aguas, es probable que llegara a formarse un caldo concentrado, cuya vida pudo tener una duración indefinida, en virtud de que no existían microorganismos capaces de descomponerlo, ni oxígeno libre susceptible de oxidar a las sustancias disueltas. La sopa primitiva, aparentemente, debió de ser rica en nutrientes (hidratos de carbono) y también abundarían los componentes estructurales, tales como proteínas y ácidos nucleicos (sustancias portadoras de los genes). Es imaginable que en una disolución de este tipo, a través de reacciones iniciadas al azar, pudieran llegar a formarse todas

---

[68] S. L. MILLER, *Science, 117, 528,* 1953.

[69] Véase un artículo de revisión sobre el tema de K. DOSE, *Unschau, 67,* 683, 1967; S. W. Fox, *The Origin of Prebiologic Systems,* Academic Press, Nueva York, 1965.

las enzimas y los demás compuestos para el origen de la vida primaria. Naturalmente, una solución que contiene todos los componentes esenciales de un ser vivo dista todavía mucho, sin embargo, de constituir un verdadero ser con vida.

Si desmontáramos mil cámaras fotográficas, todas del mismo tipo, y luego metiéramos todas las piezas en un cajón grande, donde pudiéramos mezclarlas y agitarlas, es evidente que no habría la posibilidad de que llegara, por azar, a montarse de nuevo una sola cámara; incluso en el caso de que estuviéramos agitando el cajón durante centenares de años, el azar no acudiría en nuestra ayuda. Sin embargo, los componentes de las microscópicamente pequeñas subunidades que forman las partes vitales de las células vivas se comportan en forma totalmente distinta, pues de hecho podemos asegurar que se recombinan «por sí mismas», según demuestran numerosas experiencias realizadas durante las dos últimas décadas; incluso los virus, completamente desintegrados en sus componentes, son capaces de recombinarse, para funcionar normalmente, sin la intervención de la menor ayuda exterior.

Tales procesos no son en modo alguno misteriosos, ya que pueden explicarse mediante leyes naturales bien conocidas, basadas en las propiedades químicas y la estructura tridimensional (las denominadas «propiedades estereoquímicas») de proteínas y ácidos nucleicos[70]. De esta forma, cabe también imaginar que en un principio tales componentes aislados o, más exactamente, compuestos que en el futuro iban a constituir los componentes, se originaron inicialmente de forma accidental, de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, hasta que, finalmente, se estableció un «sistema» capaz de reproducirse por sí mismo (y en número creciente), así como automantenerse en el seno de su propio medio ambiente. Según los criterios actuales, tal sistema sería considerado sumamente primitivo, pero realmente se trataría ya de un «ser vivo».

Con todo esto como excusa, hemos penetrado en el fascinante campo de la autoorganización de las macromoléculas biológicas, que debe su mayor impulso a las teorías propuestas por el Premio Nobel alemán MANFRED EIGEN; no podemos aquí discutir tales teorías detalladamente porque representaría salimos del propósito de este libro. Según EIGEN, el origen de la vida, y por tanto el desarrollo de las macromoléculas hasta convertirse

[70] Véase J. MONOD, Chance and Necessity.

en microorganismos, es tan sólo «un paso aislado entre muchos otros: partículas elementales forman átomos, átomos dan lugar a moléculas, y análogamente, organismos unicelulares originan otros multicelulares, hasta llegar, finalmente, al sistema nervioso central del hombre. ¿Por qué razón hemos de considerar dicho paso concreto, de macromoléculas a organismos unicelulares, con mayor respeto que a cualquier otro?», es la conclusión a que llega EIGEN [71].

Las estimaciones de las probabilidades de que la vida surgiera de tal forma, por azar, es decir, por una combinación accidental de dos o más componentes «que encajan», ofrecen un amplio margen de variabilidad. De acuerdo con el Premio Nobel francés JACQUES MONOD, la probabilidad es tan pequeña que el hecho crucial es probable que se diera sólo por una vez, «lo que significaría que con anterioridad al suceso en cuestión la probabilidad de que acaeciera era nula» [72].

Esta opinión, no obstante, no es generalmente aceptada; R. W. KAPLAN, biólogo alemán, obtuvo probabilidades considerablemente superiores para la coincidencia de condiciones favorables al origen de la vida. En el supuesto de que los primeros seres vivos que surgieron de esta forma fueran menos complejos que los más primitivos organismos hoy día existentes, inició sus cálculos y llegó a la conclusión, que según él mismo confiesa resultó sorprendente, de que bastaría un lago de no más de 10 kilómetros cuadrados de extensión, repleto de «sopa primitiva», para que existiera una buena probabilidad de que allí se iniciara la vida [73].

De acuerdo con este punto de vista se supone que durante los tiempos iniciales de la historia de la Tierra el suceso crucial no se dio sólo una vez, sino muchas otras; así pues, mientras la atmósfera mantenía todavía su carácter reductor, pudieron ir evolucionando, de forma independiente, distintas especies de seres vivos, con diferentes sistemas bioquímicos [74]. Finalmente, como resultado de la competencia por espacio vital, alimentos, etc., una de las especies (o un grupo de ellas estrechamente relacionadas

---

[71] M. EIGEN, *Introducción a Monod,* edición alemana, pág. xv.

[72] Monod.

[73] R. W. KAPLAN, *Umschau, 12,* 456, 1972; véase también *Naturw. Rdsch., 30,* 197, 1977.

[74] Véase N. W. PIRIE, en: A. I. OPARIN (ed.), *The Origin of Life on Earth,* I, Pergamon, Londres, 1959, pág. 76; véase también RUTTEN, pág. 129.

entre sí), tal vez llegó a adquirir carácter dominante sobre las restantes, puesto que, actualmente, todos los seres vivos están bioquímicamente interrelacionados, y esto viene a significar que también tuvieron un origen común.

2.7. DEL ALIMENTO FOSIL A LA FOTOSINTESIS

Los primeros seres vivos nacieron en una tierra de «leche y miel»; la sopa o caldo primitivo proporcionaba abundante alimento, sin que surgiera una competición a muerte con otras especies que, posiblemente, no existían al principio; tan sólo de esta forma pudieron las criaturas, todavía muy imperfectas, mantenerse, subsistir e ir armonizando sus diferentes sistemas hasta adaptarlos a su entorno ambiental.

Tal «adaptación» *no* es un proceso regulado por los propios seres vivos, pues se produce más bien gracias a pequeños errores, a los que llamamos «mutaciones», y que tienen lugar en la transferencia de genes. Para un determinado ser, la existencia de una mutación es cuestión de azar; en cambio, para un grupo constituido por un gran número de individuos rigen las leyes estadísticas, de modo que las probabilidades de que ocurra una determinada mutación, o de que se produzca la coincidencia de mutaciones, pueden ser realmente calculables.

Para las especies que ya están bien adaptadas a su ambiente, una mutación supone, por lo general, un hándicap en forma de «defecto congénito»; sin embargo, para los primeros organismos, a los que en virtud de sus sistemas pobremente adecuados les resultaba difícil sobrevivir, incluso en una tierra de leche y miel, las mutaciones, con frecuencia, representaban ventajas, pues lograban una mejor adaptación al medio, o algún tipo de acomodación interna, mejorando la coordinación de sus componentes que, inicialmente, se conjuntaron al azar. Las especies sometidas a tales mutaciones favorables resultaron dotadas de una mayor viabilidad que sus congéneres no mutantes. De esta forma pudieron superar mejor el proceso de selección natural que, finalmente, condujo a que sobrevivieran tan sólo aquellas especies mejor adaptadas a su medio ambiente.

Los organismos primitivos vivieron inicialmente a base de los compuestos químicos disueltos en el caldo primario que había sido producido mucho antes de que se originara la vida y que continuó siendo producido en cantidades limitadas; estas sustancias que contenían almacenada la

energía de la radiación ultravioleta solar que favoreció su formación eran consumidas por los organismos primitivos para hacer frente a sus necesidades energéticas, en la misma forma en que hoy nosotros utilizamos los combustibles fósiles, tales como el carbón o el petróleo, que también acumularon energía solar desde lejanos pasados tiempos. Por tanto, tales organismos, metafóricamente hablando, vivieron a base de alimento fósil.

Inicialmente, la energía contenida en los nutrientes era liberada a través de los procesos de fermentación; téngase en cuenta que muchos microorganismos primitivos todavía hoy siguen dependiendo exclusivamente de este proceso de liberación de energía. Pero incluso algunos organismos superiores dotados de respiración no olvidaron, en general, la fermentación, que es un proceso al que vuelven, como medio auxiliar, cuando, por ejemplo, el suministro de oxígeno no resulta suficiente, como en un músculo que está durante mucho tiempo sometido a fuerte tensión.

Cabe suponer que los organismos primitivos fueron gradualmente adaptándose mejor a su medio ambiente y multiplicándose rápidamente, pero a través de sus propios metabolismos *fueron empezando a determinar una alteración de su entorno ambiental.* Donde se dieron condiciones favorables, pronto la demanda de nutrientes superó a la velocidad a que tenía lugar su formación, a partir de la energía solar, de modo que las reservas de alimento fósil fueron agotándose gradualmente, con lo que empezó a surgir la amenaza del hambre.

Desde luego, esto no ocurrió en todas partes, ni mucho menos a la vez, ya que, de lo contrario, los microorganismos de la fermentación no hubieran podido sobrevivir hasta la actualidad; la escasez de nutrientes implicaba bien la necesidad de otro proceso de adaptación que tuviera en cuenta las nuevas condiciones ambientales, creadas por los propios organismos, o, en su defecto, correr el riesgo de perecer.

Otra vez la adaptación a un ambiente variante vino gobernada por el juego de azar de las mutaciones y la selección; un defecto congénito del sistema metabólico bajo las condiciones previas, con amplia disponibilidad de nutrientes, pudo muy bien significar, frente a la nueva situación en la que probablemente surgiría el hambre, el desarrollo de la habilidad de lograr subsistir y sobrevivir, a base de recurrir a medrar gracias a alguna nueva sustancia que anteriormente no fue utilizada por las especies «normales». De nuevo, esta mutación clave sólo permitió, justamente, la mera

supervivencia, de modo que tuvo que ser seguida de otras mutaciones adicionales, hasta que de nuevo se lograra una coordinación razonable entre los componentes simples cambiados, para, de esta manera, conseguir la adaptación a la utilización del nuevo nutriente.

De esta forma, diversos métodos de fermentación, así como otros distintos procesos productores de energía, debieron de ir surgiendo gradualmente, aunque no todos ellos sobrevivieran; pero más pronto o más tarde, todo el alimento fósil llegaría a agotarse, en determinadas zonas, antes de que se lograra la utilización de alguna nueva reacción productora de energía de distinto tipo; esto, en muchos casos, debió de representar ciertamente el fin y la desaparición de todo vestigio de vida, hasta que de nuevo y una vez más surgiera un «invento fundamental».

Hoy día, los seres vivos se enfrentan a una situación en la que los combustibles fósiles, es decir, la energía solar en ellos almacenada, van escaseando y, consecuentemente, haciéndose cada vez más caros; ello da lugar a que se esté tratando de encontrar otras fuentes alternativas de energía, entre las cuales una de las que mayores probabilidades ofrece es la propia energía solar. Pues bien, hace unos cuatro mil millones de años, nuestros predecesores unicelulares tuvieron que resolver su crisis energética exactamente de idéntica forma, pues cuando agotaron todo el comestible fósil tuvieron que recurrir a la utilización directa de la energía contenida en la radiación solar incidente.

La radiación ultravioleta, que tan importante papel desempeñó en la formación del caldo primitivo, no resultaba conveniente para tal propósito, debido a que hubiera destruido a los seres vivos; la solución se encontraba más bien en la luz visible, de longitud de onda más larga y que es capaz de penetrar en el agua hasta profundidades que resultan inaccesibles para la radiación ultravioleta. Mediante pigmentos adecuados su energía puede ser absorbida y utilizada para liberar el hidrógeno presente en diversos compuestos, y que es el que luego actúa como fuente energética de los procesos bioquímicos.

Como la energía solar sólo está disponible durante las horas del día, se requiere la existencia de un mecanismo de almacenaje, con objeto de hacer frente a las necesidades nocturnas; esto se consigue por medio de reacciones químicas que tienen lugar entre el hidrógeno liberado y el dióxido de carbono; los hidratos de carbono (glucosa, almidón) así producidos pueden

descomponerse (fermentados o «quemados»), con la correspondiente ganancia de energía, siempre que sea necesario. Una condición previa para que se pueda producir y almacenar este tipo de energía (fotosíntesis) es la existencia de suficiente cantidad de dióxido de carbono disuelto en el agua.

Se supone que la fotosíntesis fue inventada por antecesores de la actual bacteria púrpura que produce su hidrógeno por descomposición del sulfuro de hidrógeno; en este proceso, además de los hidratos de carbono, los productos finales son el azufre o sulfatos y agua. Todas las plantas productoras de hidrógeno por descomposición del agua, y con liberación de oxígeno como producto de desecho, es probable que procedan de antecesores del mismo tipo. La transición hacia la utilización de esta importante reacción, que requiere considerablemente mucho mayor consumo de energía luminosa que la necesaria para la descomposición del sulfuro de hidrógeno, fue lo que permitió a los organismos mantener la fotosíntesis, para poblar todo el espacio que por entonces era habitable.

Los más viejos organismos clasificables como plantas debieron de parecerse aparentemente a las presentes algas verdeazuladas o cianofíceas; como se originaron en un tiempo en el que no existía oxígeno libre en la atmósfera, tuvieron que descomponer sus hidratos de carbono por medio de la fermentación, en lugar de hacerlo por respiración; existen todavía variedades de dichas algas que subsisten en ausencia de oxígeno (en condiciones anaeróbicas) [75]; tales algas pertenecen a un amplio grupo de seres primitivos unicelulares, carentes de núcleo, denominados «procariotas»; en los océanos se encuentran formando capas, a modo de alfombras, que gradualmente van calcificándose. En el sur de Rodesia fueron encontrados depósitos calizos, denominados «estromatolitos», cuya edad se cifra en unos tres mil millones de años; así pues, la evolución de la más antigua de las familias de las plantas se remonta al pasado más remoto [76].

2.8. ¿CUAL ES LA EDAD DE LA VIDA?

---

[75] S. HILL, Journal of General Microbiology, 61, 77, 1971.

[76] RUTTEN, pág. 76; véase también J. W. SCHOPF y col., *Journal of Palaeontology, 45,* 477, 1971; G. BOND y col., *Nature, 244,* 275, 1973.

El hecho de que la vida terrestre surgiera antes de hace tres mil millones de años resulta ser un dato que sólo fue confirmado a mitad de la década de los últimos años sesenta; inicialmente, muchos científicos tenían dudas, debido a que los organismos multicelulares han existido tan sólo a partir de los últimos setecientos millones de años, y en este mismo período se desarrolló la impresionante evolución que llevó desde los microorganismos hasta el hombre. Realmente resultaba difícil comprender que, con anterioridad a tal tiempo, los seres unicelulares hubieran venido existiendo, a lo largo de un período que resultaba ser unas cinco veces más largo, sin que hubiera aparecido ninguna excitante fase evolutiva y, además, que el propio origen de la vida, a partir de materia inerte, se hubiera producido dentro de un período inferior a los mil millones de años; para muchos biólogos, tales escalas de tiempo, en el proceso de la evolución, parecían ser increíbles.

Las calizas rodesianas antes citadas, los estromatolitos, se encontraron ya en 1941, pero al principio su edad, de cerca de los tres mil millones de años, era puesta en duda; fue tan sólo a partir de la década de los años sesenta cuando surgieron pruebas adicionales en favor de que la vida apareció en tiempos mucho más remotos de lo que previamente venía suponiéndose; al final se llegó a comprender la razón de *por qué* tardaron tanto tiempo los organismos multicelulares en evolucionar: tal evolución sólo fue posible después que los propios organismos lograron proporcionar las circunstancias adecuadas, al alterar las condiciones atmosféricas ambientales.

Un trabajo fundamental de los americanos E. S. BARGHOORN y J. W. SCHOPF aportó una importante evidencia; estos científicos, a mediados de la década de los años cincuenta, estaban investigando de modo sistemático en busca de vestigios de seres primitivos microscópicamente pequeños; recurriendo a las más modernas técnicas, con la asistencia de una enorme cantidad de personal que había sido entrenado en distintos campos científicos, lograron que sus esfuerzos resultaran sumamente fructíferos.

Para empezar, tal equipo se concentró en los sedimentos canadienses, cuya edad es algo inferior a los dos mil millones de años; en dichas capas el microscopio electrónico puso de manifiesto la existencia de un gran número de características que, aparentemente, eran restos de bacterias y cia-

nofíceas petrificadas; en muchos casos pudo demostrarse, sin lugar a dudas, que tales organismos no pudieron haber invadido tales estratos después de que se hubieran formado los sedimentos.

La notable evidencia de tales hallazgos, por sí sola, hubiera sido suficiente para convencer a los científicos escépticos de que tales restos eran realmente fósiles, es decir, restos de organismos primitivos y no una configuración de origen inorgánico, formada al azar; las características de los citados hallazgos, a primera vista, parecen tener el aspecto de seres unicelulares primitivos, ,y por ello, el equipo de investigación americano trató de encontrar evidencia demostrativa del origen biológico de los restos hallados.

Uno de sus métodos consistía en la investigación estadística de la distribución por tamaños de las estructuras en cuestión; por lo que se refiere a las bacterias de unas especies determinadas, de las que en general cabe esperar que van a encontrarse en gran número y no simplemente una sola, es de suponer que sean todas, aproximadamente, del mismo tamaño y análoga forma; en consecuencia, su distribución por tamaños pone de manifiesto un acusado y bien definido máximo, mientras que los tamaños de las estructuras inorgánicas, tales como los conglomerados procedentes de petrificación de burbujas, muestran una distribución mucho más dispersa y peor definida.

Otro método consiste en la búsqueda de sustancias que puedan ser clasificadas como productos químicos fósiles, es decir, restos de los productos de descomposición de sustancias orgánicas, tales como la clorofila y los pigmentos necesarios para la fotosíntesis. No obstante, parece ser que recientemente se estima que los productos químicos fósiles solubles en el agua no han de resultar de gran utilidad, ya que, tal como señaló J. W. SCHOPF en una revisión sumamente crítica de su propia labor «es extraordinariamente difícil, por no decir imposible, poder afirmar que tales compuestos datan del tiempo en que se produjo la sedimentación, sin admitir la posibilidad de que puedan haberse introducido más tarde (por ejemplo, vía aguas subterráneas) en un pasado geológico relativamente más próximo» [77]. Por lo que respecta a los compuestos de carbono, insolubles en agua, por lo general cabe suponer que han venido formando parte desde el

[77] J. W. SCHOPF, en WINDLEY (ed.), pág. 590; véase también D. M. MCKIRDY, *Precambrian Research, 1,* 75-137, 1974.

principio de los sedimentos en que son encontrados. Sin embargo, en muchos casos resulta difícil demostrar que realmente se trata de productos de descomposición de materia biológica y no de otras sustancias de origen inorgánico.

Otra evidencia adicional en favor del origen biológico de los compuestos de carbono contenidos como inclusiones en los sedimentos canadienses la suministró la utilización de la espectrometría de masas; el carbono que ha formado parte de sustancias orgánicas a través de la fotosíntesis se distingue del otro carbono por su composición isotópica, ya que viene a estar como «etiquetado» o marcado; las moléculas de dióxido de carbono formadas con el isótopo de carbono de masa atómica 12 son más móviles que las que contienen carbono-13, que es más pesado, y, en consecuencia, las primeras pueden penetrar más fácilmente las membranas celulares de modo que resultan captadas preferentemente a las segundas en el proceso de la fotosíntesis; por ende, tanto los seres vivos como sus productos de descomposición contienen relativamente menos carbono-13 del que existe en forma de dióxido de carbono atmosférico o en los compuestos inorgánicos de carbono. Por tanto, la medida de la composición isotópica puede facilitar un método capaz de dar información acerca de si una determinada muestra de carbono es, o no, de origen biológico.

De acuerdo con estas ideas, BARGHOORN, SCHOPF y sus colegas establecieron una serie de métodos analíticos independientes que se complementaban mutuamente; cada método, por sí solo, no hubiera podido considerarse como definitivo, pero los resultados concordantes de todos ellos facilitaron buena evidencia acerca de si las viejas rocas sedimentarias contenían realmente microfósiles. Una vez confirmado este hecho en los sedimentos canadienses, cuya antigüedad era de unos dos mil millones de años [78], el mismo grupo de investigadores comenzó a analizar otros sedimentos, mucho más antiguos, procedentes de África del Sur.

Cuando se inició tal programa, a principios de la década de los años sesenta, BARGHOORN y SCHOPF no tenían la menor seguridad de encontrar algunos restos orgánicos en dichas viejas rocas, ya que, por aquel entonces, nadie conocía a ciencia cierta cuál podía ser la antigüedad de la vida sobre

[78] Véase S. A. TYLER y E. S. BARGHOORN, *Science, 119,* 606, 1954; también, *Science, 147,* 563, 1964; véase también E. S. BARGHOORN, J. W. SCHOPF y cols., *Science, 148,* 77, 1964; también, *Science, 149,* 1365, 1964.

la Tierra, y, a fin de averiguarlo, deseaban seguir sus huellas hacia atrás, hasta el más lejano pasado e incluso hasta llegar al propio origen de la vida, si es que ello era posible.

Por el mismo tiempo en que los científicos americanos comenzaban sus trabajos con los sedimentos africanos, un joven geólogo alemán estaba también trabajando muy activamente en África del Sur, desconociendo que él también iba pronto a plantearse las mismas cuestiones; se trataba de MANFRED SCHIDLOWSKI, que ya era jefe del grupo de investigación que en el Max-Planck Institut für Chemie, de Maguncia, trabajaba sobre la historia de la atmósfera, y que nos dijo: «Estaba trabajando para las minas de oro y uranio de Witwatersrand cuando leí el famoso artículo de RAMDOHR, en el que se demostraba, en virtud de pruebas geológicas obtenidas a partir de los depósitos de Witwatersrand, que hace dos mil millones de años nuestra atmósfera debía de presentar todavía una gran deficiencia de oxígeno (tema 2.4). Este fue mi primer contacto con un campo que posteriormente constituyó el objetivo de todo mi trabajo. Quedé fascinado por las conclusiones a que llegaba RAMDORH, y como yo estaba trabajando para las minas de Witwatersrand, le escribí para preguntarle si creía conveniente que allí se hicieran más investigaciones; su respuesta fue muy estimulante y, en consecuencia, empecé a recoger muestras de rocas, al principio como entretenimiento, y con ellas regresé a mi país, en 1963, después de haber terminado mi compromiso de trabajo en África del Sur». Con tal equipaje SCHIDLOWSKI había conseguido un excelente billete para emprender su carrera científica; se agregó al equipo de trabajo de RAMDOHR, en la Universidad de Heidelberg, para analizar sus muestras de rocas, bajo la dirección de tan distinguido minerólogo y petrólogo.

«Estábamos interesados en lo que entonces denominábamos, 'tucholita', sustancia carbonífera encontrada en los depósitos de Witwatersrand» —prosiguió—. Este mineral se formó, evidentemente, a partir de hidrocarburos polimerizados que inicialmente se encontraban en forma líquida o gaseosa, y que por decirlo vulgarmente se «amasó» y conglomeró bajo la acción de la radiación procedente del uranio. Para un geólogo, la simple inspección de los sedimentos revela que tales hidrocarburos vinieron formando parte de los sedimentos desde que éstos se formaron y que, en modo alguno, pudieron introducirse posteriormente. Como tales depósitos datan de mucho antes de los dos mil millones de años, y puesto que los hidrocarburos se producen, generalmente, por la desintegración de sustancias

orgánicas, tuvimos que preguntarnos: «¿Existía ya vida en la Tierra, hace unos dos mil millones de años, y con tantos seres vivos presentes que hicieran posible la acumulación de las considerables cantidades de carbono orgánico como se encuentran en los sedimentos? Cuando regresé, en 1963, con las muestras, tal cuestión no tenía todavía respuesta, de modo que con objeto de demostrar que el carbono encontrado en el citado mineral era realmente de origen orgánico, precisaba encontrar pruebas convincentes».

Colaborando estrechamente con científicos de otras Universidades, SCHIDLOWSKI utilizó los métodos aplicados por BARGHOORN y SCHOPF, previamente perfeccionados por él mismo; mediante un microscopio electrónico fue capaz de hallar, en sus muestras de rocas, una estructuras que evidenciaban claramente que, con toda probabilidad, se trataba de restos de organismos unicelulares o esporas bacteriales. Conjuntamente con J. HOEFS, de la Universidad de Gotinga, demostró que la abundancia relativa del isótopo carbono-13 se presentaba disminuida en sus muestras, lo que venía a ser una prueba del origen biológico del carbono. Sin embargo, más impresionantes resultaron los datos obtenidos en los análisis químicos realizados con A. PRASHNOWSKY, de la Universidad de Wurzburgo, ya que por medio de la cromatografía sobre papel, que era una técnica reciente muy a propósito para detectar pequeñísimas cantidades de sustancias agregadas, llegaron a descubrir hasta un total de diecisiete compuestos de indudable origen biológico en la sustancia carbonífera extraída de los depósitos de Witwatersrand, entre los cuales se encontraban aminoácidos e hidratos de carbono [79]. Según afirmó SCHIDLOWSKI, «Por lo que a mí me consta, ésta fue la primera vez que pudo ser demostrada la presencia de aminoácidos en tan viejas rocas».

Entretanto, BARGHOORN y SCHOPF publicaron los resultados de sus estudios en África del Sur y en los que pretenden haber encontrado microfósiles cuya antigüedad llega a ser hasta de unos tres mil cuatrocientos millones de años [80]. Posteriormente fue puesta en duda la autenticidad de parte de tal evidencia, pero en años más recientes SCHOPF, sus colaboradores y otros han encontrado estromatolitos y pruebas muy convincentes

---

[79] Véase J. HOEFS y M. SCHIDLOWSKI, *Science, 155,* 1096, 1976; A. PRASHNOWSKY y M. SCHIDLOWSKI, *Nature, 216,* 560, 1967.

[80] E. S. BARGHOORN y J. W. SCHOPF, *Science, 152,* 758, 1966; *Science, 156,* 508, 1967; véase también M. D. MUIR y P. R. GRANT, en: WINDLEY (ed.), pág. 595.

de la existencia de algas cianofíceas y bacterias en ciertos viejos pedernales del noroeste de Australia [81]; así pues, los científicos americanos no lograron seguir las trazas de la vida *hasta sus orígenes*, ni encontrar sedimentos *más viejos* que la vida sobre la Tierra. La cuestión de saber en qué momento se produjo la evolución de los *primeros* seres vivos sobre nuestro planeta quedó sin respuesta; sin embargo, el gran número de diversas formas de vida que se encontraron entre los sedimentos australianos parece ser una razón convincente que viene a demostrar que la vida debe remontarse bastante más allá, en el pasado que esos tres mil quinientos millones de años.

2.9. TRABAJO EN EQUIPO

Varios de los trabajos de SCHIDLOWSKI se publicaron en revistas de interés general, por lo que fueron leídos por científicos procedentes de diversos campos [82]; así, por ejemplo, CHRISTIAN E. JUNGE, que por entonces acababa de asumir la dirección del Max-Planck Institut für Chemie, de Maguncia, conoció tales actividades; JUNGE, que inicialmente era un meteorólogo especializado en problemas de química atmosférica o del aire, había logrado que tal tipo de trabajo fuera ya considerado como un campo de investigación sólidamente establecido; por aquel tiempo estaba tratando de reunir científicos, procedentes de diversos campos, con objeto de abordar problemas relacionados con el origen y la evolución de la atmósfera, tema en el que la cuestión de averiguar cuándo surgió la fuente del oxígeno atmosférico, la fotosíntesis, resultaba ser de una gran importancia, y como el trabajo científico de SCHIDLOWSKI se refería precisamente a dicha cuestión, JUNGE le invitó a que se uniera a su equipo.

En palabras del propio SCHIDLOWSKI, «Hasta entonces muchos científicos se habían ocupado, en alguna forma, de los problemas relativos a la evolución de la atmósfera, y lo esencial de la nueva idea de JUNGE era la de lograr formar un equipo que se dedicara exclusivamente a tales cuestiones; la tarea era interesante y muy atractiva para mí, de forma que me

---

[81] M. R. WALTER y col., *Nature*, 441, pág. 443, 1980; S. M. AWRAMIK, J. SCHOPF y cols., *Science*, en prensa.

[82] Véase, por ejemplo, M. SCHIDLOWSKI, *Umschau*, *68*, 566, 1968.

trasladé a Maguncia». Junto con el meteorólogo y químico del aire JUNGE y el geoquímico SCHIDLOWSKI, otros dos químicos completaban el equipo: RUDOLF EICHMANN, especialista en espectroscopia de masas, y JÜRGEN HAHN, interesado en el ciclo del nitrógeno y especialista en cromatografía de gases, que es una técnica para la medida de vestigios o trazas de sustancias.

«¿Tenían algún biólogo en el equipo?», le pregunté.

«No, aunque bien es verdad que a veces pienso que deberíamos haberlo tenido.»

El trabajo en el seno de un equipo interdisciplinar de tal tipo resultaba muy estimulante, prosiguió SCHIDLOWSKI, ya que gracias a la diferente base científica de cada uno de sus miembros puede complementarse el trabajo individual, en una forma ideal que permite cubrir un tremendo campo de conocimientos, ya que cuando se trabaja aisladamente, uno se limita mucho más a su propio y específico terreno.

«A veces me hubiera gustado también manejar el espectrógrafo de masas, jugar con todos sus mandos y analizar por mí mismo, mis propias muestras de rocas —dijo SCHIDLOWSKI, casi con cierta amargura—, pero siempre tropezaba con EICHMANN que, de forma amistosa pero decidida, me decía que me fuera a ocupar de mis asuntos, pues, según él, con sus propios técnicos podía terminar todas las medidas en unas pocas semanas», y con una sonrisa solía añadir: «Si queremos tener los resultados listos para su publicación, tan pronto como sea posible, uno de nosotros (y desde luego se refería a mí), tiene que concentrarse en la elaboración de modelos que permitan una adecuada interpretación de los datos». Bien es verdad que la división del trabajo resulta extraordinariamente eficaz; para manipular un instrumento complicado, como el espectrógrafo de masas, no basta una mera lectura de instrucciones; para quien carece de experiencia hacen falta muchos meses de esfuerzo hasta conseguir los conocimientos esenciales que le capaciten para manejar razonablemente el instrumento; de modo que gracias a nuestro sistema de división del trabajo fuimos capaces, ciertamente, de avanzar mucho más deprisa que cualquier científico trabajando individualmente.

Es, desde luego, el experto en geoquímica quien debe interpretar los análisis, y son muchos los datos que han de ser interpretados; «Nuestro equipo —prosigue SCHIDLOWSKI— analizó la composición isotópica del carbono en las muestras de rocas cuya antigüedad llegaba a ser hasta de

tres mil trescientos millones de años, y se trataba de los sedimentos más viejos hasta entonces conocidos. Nuestros resultados ponen reiteradamente de manifiesto que la quinta parte del carbono contenido en tales sedimentos se originó procedente de fuentes biológicas; idéntica proporción se encuentra al analizar sedimentos mucho más jóvenes. En consecuencia, llegamos a la conclusión, por muy sorprendente que por aquellas fechas pudiera parecer, que la fotosíntesis tiene por los menos una antigüedad de unos tres mil quinientos millones de años sobre la Tierra, y que, en tal época, las cianofíceas debían de estar ya poblando amplias zonas de la superficie terrestre» [83].

Pero esta conclusión, que está en buen acuerdo con la evidencia del hallazgo de los microfósiles de tres mil quinientos millones de años de antigüedad, encontrados posteriormente en Australia, enfrentó a los científicos que se ocupaban de la evolución de la atmósfera con problemas nuevos y aparentes contradicciones.

En primer lugar, si la vida en la Tierra se inició hace más de tres mil quinientos millones de años, la temperatura sobre la Tierra por aquel tiempo no pudo haber sido muy diferente de la actual; sin embargo, de acuerdo con la teoría cosmológica actual aceptada, la energía emitida por el Sol debía de ser de un 25 a un 30 por 100 inferior a la de hoy [84]. Esto significaría que la Tierra hubiera estado demasiado fría para que en su superficie pudiera haber subsistido el agua en forma líquida, a no ser que el llamado efecto invernadero (es decir, la absorción y devolución a la superficie terrestre de la radiación terrestre emitida en el infrarrojo por las moléculas capaces de absorber tal radiación, pág. 60) hubiera sido considerablemente superior al actual. Un intento de respuesta a tal pregunta fue avanzada por el geólogo J. C. G. WALKER y sus colaboradores [85], quienes sugieren la existencia de un mecanismo de retroacción negativo en el cual el ritmo de la acción del tiempo sobre los minerales del tipo silicatos, debida al dióxido de carbono (seguida del depósito de carbonatos sobre el lecho de los océanos) depende de la temperatura superficial, mientras ésta,

---

[83] Un amplio informe acerca de estas investigaciones viene dado por M. SCHIDLOWSKI y cols., *Precambrian Research, 2,* 1, 1975.

[84] C. SAGAN, G. MULLEN, *Sience, 111,* pág. 52, 1972.

[85] J. Geophys. Res., 86, pág. 9776, 1981.

a su vez, depende, a través del efecto invernadero, de la cantidad de dióxido de carbono existente en la atmósfera.

El segundo problema concierne al oxígeno; si la fotosíntesis se inició hace más de 3.000 millones de años, dicho gas debe de haber sido vertido en la atmósfera por los organismos que obtienen su suministro energético por medio de tal proceso. Pero los mismos depósitos de Witwatersrand, que contienen la sustancia carbonífera en la que SCHIDLOWSKI encontraba las primeras pruebas de la existencia de fotosíntesis, y por tanto de organismos productores de oxígeno desde hace más de dos mil millones de años, contenían también, por otra parte, granos o vetas de piritas y pecblenda que, a su vez, habían sido considerados por RAMDHOR como prueba evidente de que, por entonces, no debía de existir oxígeno en la atmósfera (tema 2.4). ¿Cómo puede aclararse esta aparente contradicción?, ¿y en qué forma desaparecía el oxígeno producido en virtud de la fotosíntesis?

2.10. FORMACIONES DE HIERRO EN BANDAS

Cuando las cianofíceas, así como otras plantas verdes, descomponen el agua para producir hidrógeno y realizar la síntesis de los hidratos de carbono, resulta quedar libre oxígeno como producto de desecho; sin embargo, para los primitivos organismos unicelulares este elemento químico, altamente reactivo, resultaba extremadamente tóxico; hoy día se utilizan como desinfectantes algunas sustancias capaces de liberar oxígeno, tales como el peróxido de hidrógeno o el permanganato potásico; así pues, la transición desde el consumo de sulfuro de hidrógeno al recurso del agua como materia básica para la fotosíntesis tan sólo pudo hacerse posible en el supuesto de que pudiera ser neutralizado el oxígeno tóxico; esto se conseguía gracias a una sustancia que por aquel tiempo existía disuelta en los océanos.

Mientras no había oxígeno en la atmósfera, la corteza terrestre contenía la mayor parte del hierro en forma no totalmente oxidada, es decir, lo que en el lenguaje de los químicos se denomina hierro bivalente (ferroso), y no como sucede actualmente, en que contiene hierro totalmente oxidado trivalente (férrico), que se reconoce en virtud de su típico color amarillento herrumbroso; los compuesto de hierro bivalente son fácilmente solubles en agua, de modo que en contacto con la misma las rocas continentales se disolvieron y fueron a parar a los océanos. De esta forma, allí el hierro se

fue acumulando, mientras que en la actualidad tan sólo se encuentran vestigios de compuestos de hierro en las aguas marinas.

«Para el oxígeno, una solución de compuestos ferrosos actúa como una esponja —dijo SCHIDLOWSKI—. El hierro capta inmediatamente al oxígeno, incluso en la más insignificante cantidad que exista, de modo que es de suponer que el oxígeno liberado por las algas mediante la fotosíntesis quedaría inmediatamente unido al hierro bivalente disuelto en los océanos, ocasionando la formación de óxido férrico trivalente, el cual, por no ser soluble, se depositó en el lecho marino.»

Efectivamente, los viejos sedimentos que yacieron sobre el fondo de los mares contienen enormes cantidades de minerales de hierro, a las que se denomina «formaciones de hierro en forma de bandas». El hierro que contienen tales minerales, que suministran el 70 por 100 de la producción mundial total de hierro, se encuentra completamente oxidado (trivalente). Fue el geólogo americano PRESTON quien tuvo la idea de que tales depósitos eran los «productos de desecho» resultantes de la fotosíntesis de las algas verdes primitivas, hipótesis que vino confirmada por el hecho de que la mayor parte de las formaciones de hierro en bandas se originaron en un tiempo anterior a que en la atmósfera existieran cantidades apreciables de oxígeno; según CLOUD, resulta sumamente improbable que las enormes cantidades de oxígeno necesarias para la formación de tales depósitos minerales pudieran ser liberadas en virtud de algún proceso de tipo no biológico [86].

SCHIDLOWSKI me mostró muestras pulimentadas de tales minerales en las que se aprecian bandas de un acusado rojo oscuro, casi negro, que, predominantemente, están constituidas por óxido férrico, alternando con otras, rojo claro, de hierro disperso en un material parecido al pedernal. Examinando tales depósitos con mayor atención se observa la formación de bandas a diversas escalas, desde bandas muy delgadas o microbandas a escala milimétrica, a macrobandas de docenas de metros (Fig. 7). En los grandes depósitos, todas ellas se encuentran virtualmente imperturbadas a lo largo de grandes extensiones del orden de los 150.000 kilómetros cuadrados (A. F. TRENDALL, 1982, en HOLLAND y SCHIDLOWSKI, eds., págs. 207- 209).

---

[86] P. CLOUD, *Science, 160,* 729, 1968; *Paleobiology,* 2, 351, 1976; véase también CLOUD y GIBOR.

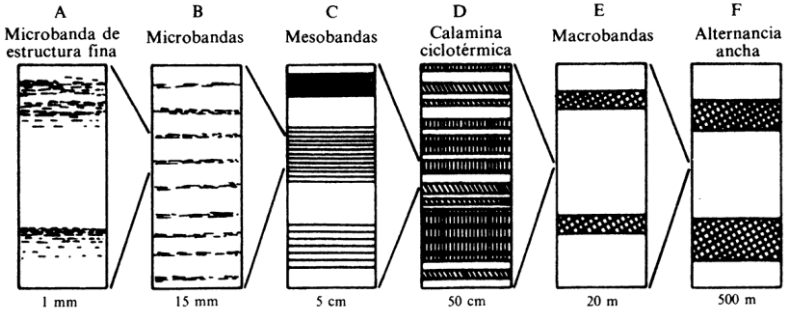


FIG. 7. Resumen de las escalas de estratificación dentro de las formaciones de hierro en bandas de la cuenca del Hamerley. *A* muestra la estructura fina dentro de las microbandas que están definidas en *B* para los minerales ricos en hierro; en *C* se indica la estructura a escala de microbandas de las mesobandas de diferentes intervalos separados por espacios en blanco; *D* muestra una periodicidad regular, en distintos tipos de pedernales, que se presenta dentro de otras periodicidades o ciclos de orden superior mostrados en *E* y *F*. (De TRENDALL, *óp. cit.)*

Un grupo de trabajo de la Conferencia de Dahlem sobre el tema «Depósitos minerales y la evolución de la biosfera», en la reunión de Berlín de septiembre de 1980 [87], estuvo de acuerdo en que las formaciones de hierro en bandas (BIF) se formaron, con toda probabilidad, en las tranquilas simas de los océanos precámbricos, donde presumiblemente existiría un grueso depósito en forma de manto de cianofíceas (Fig. 8), aunque en el estado actual de nuestros conocimientos el origen biológico de tales depósitos, tal como supone CLOUD, sólo es un supuesto que no puede ser demostrado [88].

En relación al origen de tales bandas no existe, todavía, una explicación convincente; incluso las más delgadas parecen ser demasiado gruesas para que puedan representar variaciones diarias, mientras que las microbandas bien pudieran corresponder a variaciones estacionales. De acuerdo con una interesante sugerencia debida al geólogo americano K. H. NELSON (en HOLLAND y SCHIDLOWSKI, pág. 63), la formación de bandas muy bien pudiera

[87] Proceedings H. D. HOLLAND y M. SCHIDLOWSKI, Eds., Springer-Verlag, Berlín-Heidelberg-Nueva York, 1982.

[88] A. BUTTON y col., informe del grupo; HOLLAND y SCHIDLOWSKI, página 261 y sigs.; J. H. OEHLER y col., informe del grupo, *ibíd.*, página 297.

no ser el resultado de variaciones regulares de los depósitos, sino haber tenido lugar posteriormente en virtud de la actividad de las bacterias reductoras del hierro que utilizan el oxígeno contenido en los compuestos férricos para oxidar el carbón, mientras que, al mismo tiempo, tales compuestos se reducen transformándose en ferrosos, que son solubles en agua. Así pues, la formación de bandas en los depósitos pudiera ser determinada por variaciones periódicas en el suministro de carbono, o en cierta periodicidad (inexplicable) con que se produce la precipitación de las citadas bacterias o cianofíceas responsables de la descomposición.

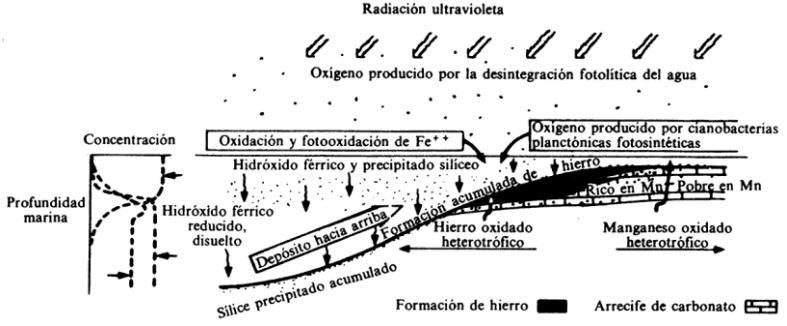


FIG. 8. Modelo conceptual de los depósitos de formaciones de hierro precámbricos.

Las formaciones de hierro en bandas se encuentran en diversas partes del globo; el volumen de tales depósitos, formados hace más de dos mil millones de años, con frecuencia resulta ser enorme. Según dice SCHIDLOWSKI, «Hasta hace unos pocos años, los depósitos encontrados en África del Sur, cuya edad se cifra en unos tres mil quinientos millones de años, eran considerados como los más antiguos, y se dudaba de que pudieran encontrarse otros sedimentos de mayor antigüedad, ya que los sedimentos también están sometidos a los ciclos geológicos que dan lugar a las formaciones orográficas y su erosión; no obstante, en 1973, geólogos británicos descubrieron sedimentos, junto a la costa occidental de Groenlandia, cuya edad fue estimada en unos tres mil setecientos millones de años, y gran parte de tales sedimentos muestran también formaciones de hierro en forma de bandas» [89].

[89] S. MOORBATH y cols., *Nature*, *245*, 138, 1973.

Una beca concedida por el Instituto de Maguncia permitió a PETER APPLE, un joven geólogo danés, comenzar la recolección de muestras de tales rocas. «Las condiciones de trabajo allí resultaban extremadamente difíciles», prosiguió SCHIDLOWSKI, «Los depósitos se encuentran al borde de la capa de hielo terrestre, y tan sólo a lo largo de un par de meses, durante el verano, el lugar resulta accesible».

En septiembre de 1976, cuando visité el Instituto de Maguncia, por primera vez, acababa de llegar de Copenhague el barco procedente de Groenlandia con las primeras muestras, pero unas pocas habían sido enviadas antes por avión; SCHIDLOWSKI pudo mostrarme una de ellas. Se trataba de una piedra de tres mil setecientos millones de años de antigüedad que no parecía presentar ninguna diferencia respecto a las otras muestras con bandas de hierro que eran varios centenares de millones de años más recientes; sin embargo, los científicos confiaban en que las rocas de Groenlandia iban a revelar una importante información. «Estamos impacientes por averiguar si tales sedimentos contienen, también, carbono de origen vegetal», manifestó SCHIDLOWSKI.

La interpretación de las pruebas halladas en las rocas de Groenlandia resultó ser bastante difícil, y continúa siendo motivo de controversias. Mientras SCHIDLOWSKI sostiene que lo más probable es que contengan carbono reducido de origen biogénico (en HOLLAND y SCHIDLOWSKI, página 115 y sigs.), la mayoría de los participantes en la citada Conferencia de Dahlem no compartían tal punto de vista (véase, por ejemplo, S. M. AWRAMIK, *ibíd.*, página 69). Las inclusiones en las rocas, de las que se había supuesto que se trataba de bacterias fósiles, según demuestra E. ROEDDER, del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos, resultan ser cristales afectados por la acción del tiempo [90]. De ser correcta la opinión de la mayoría, estas rocas sedimentarias de Groenlandia pudieran ser muy bien más antiguas que la vida sobre la Tierra, aunque la ausencia de vida en ellas no demostraría que no existía vida en ningún lugar de la Tierra, en el tiempo en que se formaron.

Sea lo que fuere, parece existir un acuerdo general en el sentido de que cualquier oxígeno producido por las algas cianofíceas del precámbrico fue inmediatamente secuestrado por el hierro ferroso disuelto en los océanos; por esto resulta fácil comprender por qué los depósitos de Witwatersrand

[90] *New Scientist, 92*, pág. 164, 1981.

contienen, en el seno de la misma capa sedimentaria, la prueba en favor de que existía una atmósfera sin oxígeno y, a la vez, la de la existencia de organismos vivientes gracias a la fotosíntesis. Durante unos dos mil millones de años, el oxígeno producido por las algas verdeazuladas, en la fotosíntesis, resultaba inmediatamente atrapado por el hierro ferroso bivalente disuelto, sin que fuera capaz de escapar a la atmósfera.

En el transcurso de este prolongado período de tiempo algunas especies de algas desarrollaron enzimas defensivas para contrarrestar los efectos del «venenoso» oxígeno, aunque tan sólo cuando la existencia de hierro bivalente, disuelto en los océanos, estuvo casi totalmente agotada, sin que el nuevo aporte procedente de los continentes fuera suficiente para proveer a todas las necesidades, comenzó dicho mecanismo de defensa a representar una mayor probabilidad de sobrevivencia; aquellos organismos dotados de las enzimas adecuadas fueron los que lograron subsistir en el seno de aguas deficitarias en hierro ferroso, donde se acumulaba el oxígeno.

Luego, el oxígeno disuelto en el agua empezó a escapar hacia la atmósfera; también pudo ser capaz de atacar al hierro bivalente contenido en minerales continentales para convertirlos, a través de un proceso en el que interviene el agua, en óxido férrico trivalente insoluble. Las piedras areniscas rojizas que así se formaron sobre los continentes datan de hace unos mil ochocientos millones de años; es muy probable que a partir de esta época, y en adelante, se acumularan cantidades apreciables de oxígeno en las capas inferiores de la atmósfera.

Al ir oxidándose las rocas continentales fue disminuyendo gradualmente el nuevo suministro de hierro bivalente hacia los océanos, hasta terminarse por completo, de modo que los sedimentos cuyas edades son de uno a dos mil millones de años rara vez contienen formaciones de hierro en bandas, ni su volumen llega a alcanzar el que poseen los depósitos más antiguos; en los sedimentos cuya edad es inferior a los mil millones de años no existen nunca formaciones de hierro en bandas; los tipos de algas capaces de subsistir tan sólo en océanos ricos en hierro bivalente y desprovistos de oxígeno fueron desplazadas por otras especies oxígeno-resistentes.

A partir de entonces, el oxígeno, liberado a través de la fotosíntesis de tales plantas, dejó de quedar atrapado por sustancias disueltas en el agua, por lo que en, su mayor parte, escapó a la atmósfera, pero como la oxidación del hierro bivalente al contacto del agua con las rocas continentales

es mucho más lento, comparativamente, a la del hierro disuelto en agua, el oxígeno fue acumulándose en la atmósfera, hasta que, finalmente, se alcanzó un nuevo equilibrio; a lo largo de la historia de la Tierra ha sido consumida en el proceso de oxidación del hierro bivalente, una cantidad total de oxígeno que viene a ser unas diez veces superior a la del oxígeno que actualmente se encuentra en la atmósfera.

2.11. UN MEDIO AMBIENTE NUEVO

Como resultado de la fotosíntesis, se originó sobre la Tierra un nuevo ambiente «artificial» que fue mantenido gracias a la actividad de los seres vivos, y la acumulación del oxígeno en la atmósfera determinó un cambio fundamental en las condiciones geológicas, de modo que todo el material oxidable, poco a poco, fue oxidándose al quedar expuesto al aire: carbono, azufre, hierro y otras muchas sustancias sufrieron este proceso.

También cambió completamente el clima de radiación; mientras en la atmósfera no existía oxígeno, y, por tanto, la luz ultravioleta lograba penetrar sin atenuación hasta el suelo, la expansión de la vida estaba limitada; según BERKNER y MARSHALL, la vida sólo podía existir entonces a 10 metros, por lo menos, debajo del agua, puesto que la parte más letal de la radiación ultravioleta quedaba absorbida a través de dicho espesor. Los recubrimientos cálcicos o silícicos de muchas especies de algas cianofíceas y otros seres biológicamente muy antiguos es probable que inicialmente actuaran a modo de escudo protector frente a la radiación; realmente, tales algas son todavía extremadamente resistentes a la radiación ultravioleta que era, desde luego, mucho más intensa cuando se desarrollaron dichos organismos [91].

Al ir acumulándose gradualmente el oxígeno en la atmósfera se fue formando el ozono, capaz de absorber la radiación ultravioleta; según BERKNER y MARSHALL, cuando el oxígeno atmosférico alcanzó un nivel equivalente al 1 por 100 de la concentración actual, el escudo protector de ozono ya resultaba suficientemente denso para que fuera posible la vida a unos pocos centímetros por debajo del nivel de las aguas; generalmente se

[91] Véase BERKNER y MARSHALL, pág. 115; véase también A. G. Fis- CHER, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 53, junio, 1965, simposio acerca la evolución de la atmósfera, pág. 1208.

acepta que tal concentración de oxígeno se alcanzó alrededor de hace unos mil quinientos millones de años.

Los organismos vivos se vieron sometidos a unas condiciones biológicas completamente nuevas, creadas por la gradual acumulación del oxígeno en la atmósfera; los ambientes protegidos contra el oxígeno, que todavía resultaba muy venenoso para ciertas especies, se hicieron cada vez más raros; tal situación se mantuvo hasta que se alcanzó la situación que hoy día prevalece y en la que existen muy pocos ambientes anaeróbicos; en este nuevo ambiente es en el que dominan las sustancias consumidoras de oxígeno, tales como las materias orgánicas en descomposición; en cambio, los microorganismos anaeróbicos tan sólo pueden sobrevivir, todavía, en ambientes tales como los que se dan en la profundidad del suelo, pantanos, en ciertas zonas de los lechos marinos o en el tracto digestivo de los animales.

Para las nuevas especies, resistentes al oxígeno, los cambios de las condiciones ambientales representaron nuevas posibilidades; tan pronto como la concentración de oxígeno alcanzó un nivel alrededor del 1 por 100 del actualmente existente en la atmósfera se hizo posible un nuevo mecanismo capaz de liberar la energía química almacenada en los hidratos de carbono, que resultaba mucho más eficiente que la fermentación: la respiración del oxígeno. Resulta razonable suponer que tal transición se produjo, precisamente, al alcanzarse el citado nivel de concentración del oxígeno; existen bacterias, denominadas opcionalmente anaerobias, que son capaces de producir energía, sin necesidad de oxígeno, por fermentación, y también por medio de la respiración, en presencia de oxígeno, y Louis PASTEUR, el famoso científico francés, ya encontró que la transición de una a otra forma de producción de energía se efectúa para una concentración de oxígeno equivalente al 1 por 100 de la que actualmente existe en nuestra atmósfera.

Para una determinada cantidad de hidratos de carbono, un organismo es capaz de liberar unas diecinueve veces más cantidad de energía por respiración que por fermentación [92]. Por esta razón, los organismos que respiran son considerablemente más eficientes que los que subsisten gracias

[92] En la transferencia de energía, el adenosintrifosfato (ATP) desempeña el papel de «pequeño cambio»; así pues, el número de moléculas de ATP que se forman constituye el factor crucial de la reacción productora de energía; por medio de los procesos de fermentación, una molécula de glucosa da lugar a dos de ATP, mientras que, mediante la respiración, se forman

a la fermentación. Este hecho, seguramente, encierra la respuesta a la cuestión de por qué, tras una evolución relativamente rápida de la vida y fotosíntesis, tuvieron que transcurrir unos dos mil millones de años, en una «era de algas cianofíceas», en los que no se registró ningún espectacular desarrollo biológico. En primer lugar, los océanos tuvieron que quedar desprovistos de su hierro bivalente, cosa que resultaba indispensable para que el oxígeno pudiera ir acumulándose en la atmósfera, y a continuación se produjo el comienzo del proceso de la respiración, siendo ambos hechos condiciones previas para que pudiera iniciarse la evolución de los organismos superiores.

Todos los organismos vivos que difieren de las primitivas bacterias y algas cianofíceas por tener un núcleo en la célula hacen frente a sus necesidades energéticas mediante la respiración; estos organismos superiores, denominados «eucariotas», datan de alrededor de unos mil cuatrocientos millones de años, de acuerdo con lo que indican los vestigios encontrados por J. W. SCHOPF en sedimentos australianos; este autor, en un trabajo publicado conjuntamente con DOROTHY OEHLER, sugiere que, en promedio, las células de los eucariotas poseen un diámetro considerablemente superior a los de bacterias y algas, y que vestigios de tales células mayores se encuentran en la mayor parte de los sedimentos de edades inferiores a los mil cuatrocientos millones de años [93].

Parece ser que esta nueva estructura desarrollada por los seres unicelulares pudo ser la condición previa necesaria para la siguiente fase evolutiva, que fue la que constituyó el origen de los organismos pluricelulares, todos ellos eucariotas y, por tanto, seres que respiran; sus vestigios datan casi desde hace unos setecientos millones de años, época a partir de la que se inició una vigorosa evolución, en la que continuamente fueron surgiendo nuevas y cada vez más superiores formas de vida.

---

treinta y ocho moléculas de ATP. En relación a las calorías, la respiración rinde «sólo» catorce veces más energía que la fermentación; esta energía, no obstante, es utilizada más efectivamente en el proceso de respiración, de modo que, a fin de cuentas, se producen diecinueve veces mayor número de moléculas de ATP.

[93] J. W. SCHOPF y D. OEHLER, *Science, 193,* 47, 1976.

Por aquellos tiempos, se admite generalmente que los continentes no estaban todavía habitados, aunque incluso esto resulta en la actualidad materia de debate; según SUSAN E. CAMPBELL y S. GOLUBIC, de la Universidad de Boston, las cianofíceas unicelulares procariotas podrían haber existido sobre la Tierra incluso desde hace dos mil quinientos millones de años, formando entretejidos similares a costras del desierto que se encuentran hoy en los desiertos americanos, en lugares donde no pueden ser hollados y destruidos por los hombres o animales [94]. Como antes fue mencionado, las cianofíceas son extraordinariamente resistentes frente a la radiación ultravioleta; sin la existencia de microorganismos capaces de medrar sobre tierra, incluso en tiempos anteriores al precámbrico, cuando todavía no existía el escudo protector en forma de ozono ante la radiación ultravioleta, resulta difícilmente explicable la existencia de suelos precámbricos que contienen carbono reducido, de aparente origen biogénico [95]. La existencia de «tejidos desérticos» precámbricos, pudiera ser, no obstante, una de las razones capaces de explicar por qué el ritmo de sedimentación precámbrica no fue muy superior al actual, a pesar del hecho de que por aquel tiempo no existieran zonas forestales capaces de proteger a los suelos de la masiva erosión.

Sea como fuere, los organismos multicelulares aparecieron sobre la Tierra solamente mucho más tarde, y por todo lo que conocemos, no fueron consecuencia de un proceso evolutivo a partir de cianofíceas terrestres, sino de otros seres marinos multicelulares. Para los seres vivos que se habían desarrollado en los océanos resultaba difícil avanzar hacia un medio no acuático, donde se requería algún ingenio especial para asegurar el indispensable suministro de agua. Además, la gravitación planteaba un problema nuevo a los seres multicelulares, y el clima de radiación, en tierra, resultaba todavía sumamente duro; sin embargo, con el gradual aumento de la concentración del oxígeno atmosférico la radiación ultravioleta fue siendo absorbida cada vez más en las altas zonas de la atmósfera, de modo que la capa de ozono se fue desplazando, también, hacia alturas superiores; en opinión de BERKNER y MARSHALL, cuando el oxígeno en la atmósfera

---

[94] Véase E. D. GOLDERG, ed., Springer-Verlag, Berlín-Heidelberg-Nueva York, en prensa.

[95] C. LORIUS, Laboratoire de Glaciology, Grenoble; comunicación personal.

alcanzó un nivel igual al 10 por 100 de la concentración actual, se empezaron a dar las condiciones correctas para que pudieran comenzar a poblarse los continentes.

Probablemente no resulta muy realista, en este contexto, hablar de que se produjo una «conquista de la Tierra», ya que no estamos hablando de alguna especie de antecesores de los vikingos, quienes, osadamente y guiados por el ansia de aventuras, partieron hacia nuevas fronteras (aunque dejamos también abierta la cuestión de si realmente tal fue el caso con los vikingos reales); por contra, más bien podríamos hablar de un tipo de antepasados de Robinson Crusoe, puesto que los organismos, en virtud de las condiciones desfavorables, se vieron forzados a ajustarse a un nuevo medio ambiente. Las poblaciones de los lagos o lagunas que gradualmente iban quedando en seco, así como los organismos lanzados sobre las playas, por la acción de las mareas, quedaban, antes, condenados a morir por destrucción bajo la acción de la radiación ultravioleta; ahora, en cambio, tenían ya una pequeña esperanza de poder sobrevivir o, dicho de otra forma, entre los miles de millones de criaturas que tuvieron que enfrentarse con tales desfavorables condiciones, de vez en cuando uno de ellos pudo ser capaz, en alguna forma, de subsistir, gracias a que se dio la favorable circunstancia de que sufriera las adecuadas mutaciones y, de tal forma, pudo ser el antecesor de una cierta especie que ya fue capaz de vivir en tierra firme. En esta forma, los continentes fueron colonizados gradualmente por microorganismos y plantas durante el período geológico denominado «silúrico», hace unos cuatrocientos veinte millones de años. A principios de la era carbonífera, hace unos trescientos cincuenta millones de años, existían sobre la Tierra gigantescas plantas multicelulares, y esta nueva vegetación terrestre, con su fotosíntesis, determinó un nuevo incremento en la producción de oxígeno.

Mientras no crecieron plantas sobre las tierras, las rocas continentales desnudas estaban sin protección y, por tanto, expuestas al impacto de la radiación solar, vientos e inclemencias del tiempo. Los procesos ligados a los elementos del tiempo y la erosión de montañas, con la consiguiente pérdida geológica de oxígeno, debieron de actuar mucho más rápidamente que bajo las condiciones actualmente existentes. Por tanto el nuevo manto vegetal contribuyó a determinar un aumento de la concentración del oxígeno atmosférico, y no tan sólo a través de la intensificación del ritmo a que se verificaba la fotosíntesis, sino también en forma directa, en virtud

de la disminución de la actividad erosiva sobre las montañas. Por otra parte, los organismos que determinaban la descomposición de los restos de las plantas muertas estaban en fase de desarrollo, por lo que, en consecuencia, los procesos de desintegración de la materia orgánica se producían a un ritmo mucho más lento que en la actualidad. Los enormes depósitos de carbón del período carbonífero son, probablemente, tan sólo unos restos de las enormes cantidades de materia procedente de los vegetales muertos que por aquel entonces fueron acumulándose. Esto explica por qué BERKNER y MARSHALL, así como otros científicos, suponen que el oxígeno atmosférico alcanzó, en tan sólo unos siete millones de años, niveles diez veces superiores, para situarse en valores análogos, o tal vez incluso superiores, a los presentes.

En la actualidad se discute si, a partir de entonces, se produjeron cambios en la composición atmosférica y cuál pudo ser su importancia. A partir del ininterrumpido esquema evolutivo, no obstante cabe ciertamente admitir que siempre prevalecieron unas condiciones mínimas para la subsistencia de organismos terrestres; en consecuencia, el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera no alcanzó probablemente nunca un nivel inferior a una tercera parte del actual, ya que en otro caso la fotosíntesis hubiera llegado a detenerse. Por otra parte, la evolución de los órganos respiratorios de los animales refleja claramente el gradual incremento sufrido por el contenido de oxígeno en la atmósfera. Paso a paso, se fueron desarrollando formas más eficientes para la utilización de la energía, pero que requerían un creciente consumo de oxígeno. Los animales de sangre caliente, que necesitan, por los menos, un nivel igual a las dos terceras partes del que actualmente tiene el oxígeno en la atmósfera, han venido viviendo sobre la Tierra desde hace, aproximadamente, unos doscientos cincuenta millones de años; en consecuencia, cabe suponer que las concentraciones del oxígeno nunca descendieron por debajo de dicho nivel a lo largo de tal período de tiempo.

2.12. EL ORIGEN DE LOS CICLOS BIOLOGICOS

Desde la «invención» de la fotosíntesis existieron dos clases de seres vivos sobre la Tierra, a saber, aquellos que eran organismos capaces de mantenerse a sí mismos y otros que carecían de tal posibilidad. Los prime-

ros, denominados «autotróficos», toman del medio ambiente tan sólo materiales estructurales, tales como compuestos de nitrógeno, azufre y fósforo y las sustancias básicas para la fotosíntesis, tales como dióxido de carbono y agua (o sulfuro de hidrógeno). Los segundos, biogenéticamente más antiguos, incapaces de automantenerse (heterotróficos), son seres que no tan sólo necesitan para su metabolismo materiales estructurales, sino también combustible, básicamente hidratos de carbono, que ellos son incapaces de producir por sí mismos; al principio subsistían a base de diversos compuestos ricos en energía que estaban disueltos en el primitivo caldo o sopa y del que, hasta cierto punto, se reabastecían, en tanto que la atmósfera carecía de oxígeno. Al iniciarse la fotosíntesis surgió una nueva fuente de nutrientes para tales seres: los productos metabólicos y de descomposición de los autotróficos, e incluso a estos mismos seres, ya que todos contienen compuestos de carbono, con la consiguiente energía química almacenada.

En principio, pues, se alcanzaron ya las condiciones necesarias para que diera comienzo un ciclo biológico; los hidratos de carbono, elaborados por los autotróficos, podrían ser descompuestos de nuevo por los heterotróficos; sin embargo, antes de que se desarrollaran los organismos capaces de respirar, tal ciclo no se cerraba, puesto que la fermentación no es un proceso de oxidación que sea capaz de reproducir las sustancias básicas, dióxido de carbono y agua, a partir de los hidratos de carbono. En consecuencia, en tal proceso tan sólo se libera una pequeña parte de la energía requerida para la formación de los hidratos de carbono; los productos finales del proceso de fermentación resultan ser, todavía, compuestos de carbono oxidables, relativamente complejos.

Bajo condiciones favorables, los depósitos de combustibles fósiles pueden formarse a partir de restos, parcialmente descompuestos, de organismos muertos. No obstante, por lo general, escapan los compuestos volátiles, de modo que en los sedimentos queda tan sólo carbono disperso. Durante los dos mil millones de años en que existió la fotosíntesis, pero en que todavía no hubo oxígeno libre ni respiración, fueron acumulándose, en los lechos marinos, enormes cantidades de carbono que de esta forma entraron a formar parte del ciclo geológico.

Parece ser como si los primeros ciclos biológicos ya realmente cerrados lo fueron gracias a bacterias que no obtenían su energía ni por fermentación, ni por respiración, en la forma usual, sino que más bien lo hacían a

través de un metabolismo especial en el que el oxígeno, necesario para la oxidación de la materia orgánica en descomposición, era proporcionado por ciertos compuestos ricos en oxígeno, como los nitratos; en el capítulo 4 volveremos a ocuparnos de este tipo de respiración por nitratos, que es como se denomina a tal proceso. Además de los nitratos, también los sulfatos y el óxido férrico trivalente puede servir como fuente de oxígeno. Los productos finales de tal metabolismo son el dióxido de carbono y el agua, junto con sustancias reducidas, tales como nitrógeno, sulfuros o compuestos de hierro bivalente, respectivamente. Este tipo de bacterias pueden encontrarse, todavía, tanto en las profundidades de los océanos, como a cierta profundidad por debajo del suelo; son, por tanto, anaerobias, en sentido optativo u obligatoriamente, es decir, que no requieren necesariamente oxígeno libre (optativo) o son incapaces de subsistir en su presencia (obligatorio); tales bacterias siguen desempeñando aún un importante papel, aunque a menudo es ignorado, en la circulación global de las sustancias. Como es natural, su importancia fue notablemente mucho mayor durante la «era de las cianofíceas», antes de que se originara la atmósfera de carácter oxidante en tiempos en los que, probablemente, poblaron también los océanos. De no haber existido estos microorganismos, capaces de reconvertir hierro trivalente en otro bivalente soluble, probablemente hubiera sido preciso mucho menos tiempo, en lugar de estos dos mil millones de años, para que se hubiera agotado todo el hierro bivalente disuelto en los océanos y, por tanto, el oxígeno hubiera podido escapar, mucho antes, hacia la atmósfera.

Es probable que el azufre y el carbono hayan estado vinculados en otro ciclo. Por un lado, del ciclo de la bacteria púrpura (pág. 73) se producían hidratos de carbono y sulfatos a partir del sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, mientras que por el otro, las bacterias que pueden clasificarse como «respiradoras de sulfatos» «queman» la sustancia orgánica en descomposición (carbono) para convertirla en dióxido de carbono, a base de utilizar el oxígeno de los sulfatos.

Al originarse la presencia de una atmósfera oxidante, los ambientes en que tales microorganismos reductores podían seguir medrando se hicieron cada vez más limitados; así pues, la fotosíntesis y la respiración, suplementándose mutuamente entre sí, se convirtieron, con gran diferencia, en el ciclo biológico más importante; ambos son procesos complicados que pasan por varias fases intermedias, pero si consideramos exclusivamente

las sustancias básicas y los productos finales, pueden ser descritos con sencillez mediante las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\text{dióxido de carbono + agua + energía} \underset{\text{respiración}}{\overset{\text{fotosíntesis}}{\rightleftharpoons}} \text{hidratos de carbono + oxígeno}$$

$$CO_2 + H_2O + \text{energía} \rightleftharpoons (CH_2O) + O_2$$

El CH_2O, que figura entre paréntesis, no quiere significar simplemente formaldehído, sino más bien la relación existente entre los átomos de carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) que forman el bloque estructural básico de las moléculas de mayor tamaño, tales como las de glucosa ($C_6H_{12}O_6$).

Este esquema de la reacción que se verifica en la fotosíntesis no muestra que la cantidad total de oxígeno liberada en el proceso no se origina a partir del dióxido de carbono, sino que más bien procede del agua. No obstante, para el tema de nuestro libro esto no resulta importante, ya que podemos limitarnos a decir que a cada molécula de dióxido de carbono que interviene en la fotosíntesis de las plantas verdes corresponde una molécula de oxígeno desprendida en el medio ambiente y a un átomo de carbono que entra a formar parte de los procesos biológicos.

2.13. ¿ESTA EQUILIBRADO EL CICLO A LARGO PLAZO?

Desde la evolución de los organismos capaces de respirar, la mayor parte del oxígeno liberado, en virtud de la fotosíntesis, es consumido por ellos; las cantidades de carbono sin oxidar que fueron sepultadas en los sedimentos, así como los correspondientes «excedentes» de oxígeno en la atmósfera (págs. 19 y 43), probablemente no fueron siempre tan pequeños como lo son actualmente; sin embargo, frente a la producción total constituyeron una fracción despreciable, a lo largo de los últimos trescientos millones de años.

Parte de tales excedentes de oxígeno pueden haber oxidado al carbono contenido en los sedimentos que, en el transcurso de los ciclos geológicos y tras centenares de millones de años, pueden haber vuelto a surgir sobre

la superficie terrestre; otra fracción interviene en los procesos atmosféricos ligados a los factores del tiempo y que determinan la oxidación del hierro, azufre y otras sustancias. Otras reacciones de carácter inverso, y en las que compuestos de hierro o de azufre, totalmente oxidados, son reducidos, tienen lugar, principalmente, en los lechos oceánicos y en el interior de la Tierra.

Existen, pues, diversos grupos de procesos que no dependen directamente uno de otro y que pueden considerarse como formando parte de un ciclo a largo plazo. Durante los últimos y recientes pasados años, los científicos trataron repetidamente de cuantificar tal ciclo y elaborar un diagrama de flujo que comprendiera, por lo menos, sus características más importantes [96]. La figura 9 constituye un ejemplo, y es el que fue publicado por el grupo de Maguncia. En lo que respecta a los detalles de las diversas ramas y cifras, los modelos que hasta la fecha han sido elaborados difieren claramente entre sí; sin embargo, a pesar de las distintas cifras, todos los autores basan sus modelos en el supuesto de que existe alguna especie de equilibrio estacionario, o por lo menos que tal equilibrio existía antes de que los hombres interfirieran con los ciclos naturales.

[96] R. H. WHITTAKER, *Communities and Ecosystems*, Nueva York, 1970, pág. 142; J. C. G. WALKER, *American Journal of Science, 274*, 193, 1974; SCHIDLOWSKI y cols., *Precambrian Research;* GARRELS y colaboradores.

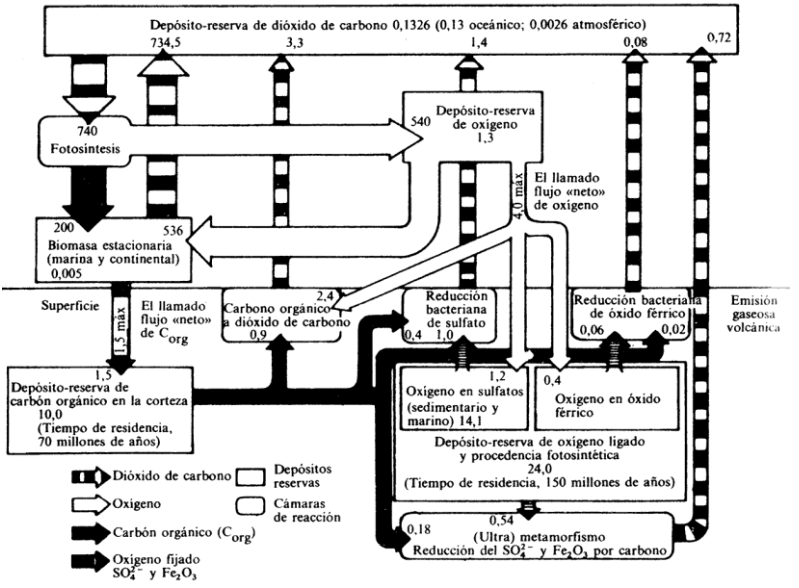


FIG. 9. Esquema que nos muestra los flujos en un ciclo combinado del carbono orgánico-oxígeno, según el modelo formulado por el grupo de Maguncia; las cifras para los depósitos-reserva (enmarcadas) se expresan en miles de billón de toneladas, las de flujos en centenas de millones de toneladas por año. No se muestra en la figura el ciclo del carbonato (caliza), que comprende unas cuatro veces la cantidad de carbono involucrada en el ciclo «orgánico». Según WHITTAKER y LIKENS, el balance del ciclo fotosintético (canales anchos) es casi cuatro veces mayor del que damos aquí, es decir, casi 80.000 millones de toneladas por año. No representa, sin embargo, ninguna consecuencia directa en relación al volumen involucrado en el ciclo sedimentario (canales estrechos). Las cifras correspondientes a lo que denominamos flujo «neto» de oxígeno y flujo «neto» de carbono orgánico ($C_{org.}$) son valores máximos. Según el grupo de Maguncia, las cifras reales podrían ser inferiores, en un factor de 1,5 a 4, lo cual correspondería a los valores supuestos por GARRELS y MACKENZIE. En tal caso, los tiempos de residencia en los depósitos-reserva sedimentarios serían consiguientemente mayores. El equilibrio estacionario del ciclo que aquí se supone no ha sido todavía demostrado. (De SCHIDLOWSKI y cols., *Precambrian Res.*, 2, 55, 1975.)

La subsistencia de un estado estacionario de dicho tipo tan sólo resulta posible si el excedente de oxígeno, existente en virtud de la sedimentación del carbono sin oxidar, viene a equilibrar exactamente al que se pierde a través de los procesos geológicos; parece ser que tal supuesto no entra en conflicto con los hechos de observación. Evaluaciones independientes,

aparecidas en la literatura científica, llegan a encontrar magnitudes concordantes para ambos procesos. No obstante, JAMES C. G. WALKER, un geólogo americano autor de uno de estos diagramas de flujo, señala concretamente que los datos de que se dispone en la actualidad son totalmente incompletos para que podamos llegar a una conclusión, digna de confianza, acerca de que tal equilibrio pueda ser realmente mantenido [97].

No existe una clara relación directa que permita establecer una concordancia entre la cantidad de carbono sepultado en los sedimentos (en el cuarto depósito de reserva) con la pérdida geológica de oxígeno. De hecho, tal tipo de equilibrio *no pudo* haber existido en el pasado geológico; en caso de no haberse registrado un período durante el cual la liberación de los excedentes de oxígeno superara al ritmo al que se producían las pérdidas, en virtud de los procesos de alteración determinados por la acción de los factores atmosféricos del tiempo, resulta impensable que se produjera una acumulación de oxígeno en la atmósfera.

Tan sólo cabe esperar un crecimiento en la abundancia del oxígeno en la atmósfera si al mismo tiempo se produce un aumento correspondiente de la cantidad de carbono almacenado en la materia orgánica o en los sedimentos, y tal aumento tan sólo puede persistir mientras exista una suficiente disponibilidad de material básico, es decir, dióxido de carbono, a partir de la cual las plantas verdes logran producir oxígeno. Originalmente, tal dióxido de carbono procedía por exudación del interior de la Tierra (pág. 31), pero estos procesos de desgasificación, a todos los efectos, terminaron hace unos trescientos millones de años [98]. La mayor parte de los gases que actualmente resultan desprendidos en las erupciones volcánicas son, probablemente, materiales procedentes de reciclados, esto es, son productos de reacción de sedimentos que fueron transportados hacia el interior de la Tierra a través de procesos geológicos a gran escala.

Cuando la desgasificación procedente del interior de la Tierra llegó a su fin, prevaleció la condición más importante para el establecimiento de un estado de equilibrio: a partir de entonces y en adelante, la masa total de la materia constituida por sustancias circulantes no experimentó ningún nuevo aumento, y los únicos cambios posibles fueron de tal tipo que tan

---

[97] WALKER, pág. 202.

[98] Véase SCHIDLOWSKI y cols., *Precambrian Research*, págs. 45 y 54.

sólo pudo aumentar el contenido de un depósito de reserva a expensas de la disminución sufrida por otro. Cuando, prácticamente, *ninguna* nueva emisión de dióxido de carbono surgió ya del interior de la Tierra, la cantidad de oxígeno almacenada en la atmósfera, sólo pudo incrementarse a expensas de las cantidades del mismo contenidas en otros depósitos; por ejemplo, en los de dióxido de carbono y de otras sustancias que contengan oxígeno.

Durante cortos períodos de tiempo, un aumento de la cantidad de oxígeno atmosférico, gracias a una intensificación del ritmo a que tiene lugar la fotosíntesis, solamente resulta posible en el caso de que, simultáneamente, la cantidad de carbono que entra a formar parte de los sedimentos experimente también el correspondiente aumento; no obstante, tal proceso de crecimiento sólo puede sostenerse mientras el superior ritmo de consumo del dióxido de carbono atmosférico sea compensado mediante la subsiguiente liberación del mismo gas, por parte de otros depósitos de reserva. Cálculos con modelos, llevados a cabo por los geólogos americanos GARRELS, MACKENZIE y LERMAN, han demostrado que, por ejemplo, la duplicación del ritmo a que se produce el proceso de la fotosíntesis, determinaría que tal proceso llegara a su fin en un período de tan sólo un millón de años, en virtud de la progresiva escasez y final agotamiento del dióxido de carbono atmosférico [99]. En tal intervalo de tiempo, que hemos de considerar muy corto a escala geológica, la concentración del oxígeno atmosférico aumentaría desde un 21 a un 22 por 100. Un crecimiento continuo, a lo largo de períodos más prolongados, tan sólo resulta posible a ritmos mucho más lentos y que dependen de la rapidez con que el dióxido de carbono «usado» pueda ser repuesto a partir de la reserva oceánica (y, en último término, procedente de los hidratos de carbono). Los procesos de intercambio gaseoso, entre las capas profundas de los océanos y la atmósfera, resultan, simplemente, incapaces de hacer frente al tremendo consumo de dióxido de carbono que implicaría una duplicación del ritmo global a que se produce la fotosíntesis. Por otra parte, es probable que existan otros mecanismos de retroacción, capaces de contrarrestar un incremento del oxígeno, aunque por ahora no esté todavía clara la forma exacta en que puedan actuar.

---

[99] Véase GARRELS y cols.

Otra condición para que se mantenga un estado de equilibrio exige que la cantidad total de oxígeno ligado al hierro y compuestos de azufre no aumente, a pesar del hecho de que aún existen en la corteza terrestre grandes masas de hierro oxidable y compuestos de azufre capaces de contener bastante más oxígeno del que, en la actualidad, existe en la atmósfera. Por tanto, las reacciones de oxidación que indudablemente tienen lugar en los procesos que sufren las rocas bajo la acción de los factores del tiempo tienen que estar compensadas por otros procesos inversos; esto ocurre gracias a la acción de los microorganismos reductores, tales como los que respiran sulfatos (pág. 91), así como en virtud de reacciones químicas que ocurren en el interior de la Tierra cuando los sedimentos resultan fundidos a grandes profundidades (los geólogos denominan a estos procesos «granitización» o «ultrametamorfosis»). En ambos casos, la reducción tiene lugar en presencia de carbono sedimentado que en el proceso se convierte en dióxido de carbono. La cantidad de oxígeno consumido en los procesos ligados a la acción de los factores del tiempo y la producción de dióxido de carbono producida en virtud de los procesos de reducción biológica y geológica no es preciso que resulten exactamente equilibrados entre sí. Es posible que existan también mecanismos de retroacción, si bien por el momento son desconocidos.

La concentración del oxígeno atmosférico no puede aumentar directamente a cuenta del que se encuentra ligado químicamente al hierro y al azufre, debido a que la baja temperatura existente sobre la superficie de la Tierra no permite que tengan lugar reacciones capaces de producir oxígeno libre a partir de tales compuestos. El resultado de los procesos reductores es el dióxido de carbono, y el oxígeno puede surgir, tan sólo, en una segunda etapa al producirse en el proceso de la fotosíntesis de las plantas. Por otra parte, el oxígeno atmosférico puede ser utilizado directamente en la formación de compuestos de hierro y azufre; si, por ejemplo, en virtud de un incremento en el ritmo a que tiene lugar la erosión, las pérdidas geológicas de oxígeno se hacen mayores, esto puede ocasionar una disminución del oxígeno atmosférico, a no ser que se incremente, al mismo ritmo, el proceso de reducción biológica o geológica de los compuestos de hierro y azufre, ricos en oxígeno. Además, no tan sólo conduce a un incremento en las pérdidas de oxígeno, en virtud de sus reacciones con el hierro y azufre, sino también a un aumento en la oxidación del carbono, contenido

en los sedimentos, lo que trae como consecuencia una reducción en la cantidad de carbono acumulado en el cuarto depósito de reserva; por tanto, el oxígeno atmosférico sufre, en consecuencia, una nueva reducción.

Según GARRELS, MACKENZIE y LERMAN ésta es exactamente la situación a la que hoy día nos enfrentamos. Durante la Conferencia de Dahlem me decía FRED MACKENZIE: «Existe un punto importante en el que nuestros diagramas de flujo y el presentado por SCHIDLOWSKI y sus colegas difieren; mientras el grupo de Maguncia parte del supuesto o postulado de que en las condiciones *presentes* existe un equilibrio estacionario, nosotros tenemos nuestras dudas; en nuestro modelo, las pérdidas geológicas de oxígeno están plenamente compensadas por los excedentes de oxígeno debidos a la sedimentación del carbono si se toman en consideración los actuales ritmos de erosión; opinamos que un equilibrio de tal tipo tan sólo puede ser considerado como una condición *promedia* a lo largo de los últimos trescientos millones de años. En el momento actual, no obstante, y en virtud de las interferencias ejercidas por el hombre sobre estos ciclos naturales y los consiguientes aumentos en el ritmo de erosión, tal equilibrio ha de resultar, probablemente, perturbado».

SCHIDLOWSKI admitió efectivamente que muy bien pudiera ser éste el caso: «Nuestro diagrama de flujo fue tan sólo un primer intento para tratar de comprender tan complicados procesos; no cabe la posibilidad de excluir aquellas variaciones a corto plazo, tales como pueda ser la interferencia humana, que son capaces de superponerse al equilibrio a largo plazo; las razones aducidas por GARRELS y sus colegas son realmente muy merecedoras de ser tenidas en cuenta.»

La extensión global de la erosión, y por tanto también el ritmo a que se suceden las pérdidas geológicas de oxígeno, dependen de las dimensiones y alturas medias de los continentes, que estuvieron sometidas a diversos cambios a lo largo de la historia de la Tierra. El ritmo de erosión que se ejerce sobre los jóvenes y altos pliegues de cadenas montañosas es mucho más rápido que el que se registra en viejos macizos que fueron ya ampliamente trabajados por la erosión. Así pues, durante los períodos que siguieron a un reforzamiento de la actividad orogénica, la erosión debió de ser, también, considerablemente mayor. No obstante, en promedio, y para el transcurso de un largo período, el sistema se mantuvo siempre casi equilibrado, sin desviarse demasiado del equilibrio real, en opinión de MACKENZIE.

La extensión de la cubierta vegetal sobre los continentes, durante los últimos trescientos o cuatrocientos millones de años, es otro factor adicional que ha retardado, ciertamente, el ritmo de la erosión y conducido a un nuevo estado de equilibrio; tal condición es la que ahora está siendo perturbada por los cambios que los hombres han venido introduciendo en el manto vegetal. Basándose en los datos de JUDSON (pág. 40), según los cuales la civilización ha determinado que se triplicara el ritmo a que se produce la erosión, GARRELS, MACKENZIE y LERMAN han evaluado las consecuencias, que a largo plazo, pueden representar tales hechos, en relación a la atmósfera; sus resultados sugieren que dentro de dos millones de años el nivel del oxígeno atmosférico habrá disminuido alrededor de un 15 por 100, mientras que se habrá duplicado el contenido del dióxido de carbono [100]

«Para los cortos intervalos de tiempo de los que tratamos aquí, en la Conferencia de Dahlem, esto no tiene ninguna importancia —subrayó MACKENZIE—. Incluso en el caso de que la cifras dadas por JUDSON fueran demasiado pequeñas, como nosotros consideramos muy posible, es decir, en el supuesto de que el presente ritmo de erosión fuera cuatro o cinco veces superior del valor promedio correspondiente a las últimas centenas de millones de años, el hecho no tendría ningún efecto espectacular sobre la composición de la atmósfera, en los próximos siglos, o incluso milenios. Sin embargo, a largo plazo, tal incremento del ritmo de erosión, provocado por el hombre, con las consiguientes pérdidas geológicas de oxígeno, tendrá un impacto que será mucho más drástico, todavía, que el que determinará la quema total de los combustibles fósiles.»

[100] Ibíd.

CAPÍTULO 3

El aumento del dióxido de carbono. ¿Cuál puede ser la Importancia de tal riesgo?

3.1. EL DIOXIDO DE CARBONO ATMOSFERICO Y EL CONSUMO COMBUSTIBLE

Desde 1957 a 1975, la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera se ha incrementado, pasando de 312 a 326 partes por millón (ppm), lo que viene a ser casi un 5 por 100; esta tendencia ha sido medida tanto por los científicos americanos del grupo de C. D. KEELING como por meteorólogos suecos, bajo la dirección de B. BOLIN, a partir de 1963 (pág. 21) y en zonas alejadas de cualquier localización de focos emisores de dióxido de carbono, con objeto de lograr medir valores de «fondo» y, en consecuencia, poder determinar las tendencias seguidas por las concentraciones del dióxido de carbono [101]. Los americanos obtuvieron sus datos en Mauna Loa, Hawai, y en el polo sur, mientras que los suecos lo hicieron a partir de muestras de aire tomadas, mediante sistemas especiales instalados en la flota de aviones comerciales, durante los vuelos por la ruta polar.

Del período anterior a 1957 existen tan sólo algunos datos aislados, no sistemáticos, que, por tanto, ofrecen menor garantía; fueron recogidos por el geofísico británico G. S. CALLENDAR [102], y a pesar de que presentan una notable dispersión, concuerdan con las medidas posteriores de mayor precisión.

La concentración del dióxido de carbono en el aire, antes de que se advirtieran los efectos de la industrialización, se cifraría, en opinión de KEELING, en unas 290 partes por millón, aunque hay recientes indicios que hacen pensar que tal vez fuera considerablemente menor, tal vez del orden de 260 a 270 ppm (véase más adelante).

---

[101] Véase C. A. EKDAHL, C. D. KEELING, *óp. cit.* (véase cap. 1, nota 3); B. BOLIN y W. BISCHOF, *Tellus, 22,* 431, 1970; W. BISCHOF, Report AC-36, Department of Meteorology, University of Stockholm, 1976. Véase también G. M. WOODWELL, *Scientific American,* enero, 1978, pág. 34.

[102] G. S. CALLENDAR, *Tellus, 10,* 243, 1958.

En los últimos años, el incremento anual viene a ser del orden de 8 a 10.000 millones de toneladas de dióxido de carbono (lo que corresponde de 2,2 a 2,8 mil millones de toneladas de carbono), o algo así como 1 ppm anual. Para los meteorólogos y geofísicos que realizaron las medidas parecía lógico, al principio, que todo este dióxido de carbono extra, o por lo menos gran parte del mismo, procedía de la combustión de combustible fósil [103]; en consecuencia, comenzaron a analizar las estadísticas energéticas mundiales y calcularon que la cantidad de dióxido de carbono producida por la combustión de carbón, petróleo y gas natural era, en 1975 [104] y en los siguientes años, de unos 18.000 millones de toneladas (equivalentes a unos 5 000 millones de toneladas de carbono), es decir, alrededor de la propia cantidad que quedaba en la atmósfera.

La quema de madera, estiércol animal, paja, etc., que constituye casi la mitad de los focos energéticos en los países en vías de desarrollo [105], no fue tenida en cuenta por KEELING, como tampoco lo fueron las cantidades de dióxido de carbono desprendidas en prácticas agrícolas de tala e incineración de rastrojos tras la cosecha, ni los incendios forestales de carácter natural [106].

---

[103] En 1954 ya señaló G. E. HUTCHINSON que el incremento del dióxido de carbono atmosférico era parcialmente debido a la limpieza de las selvas y la destrucción del humus; sin embargo, tal sugerencia no fue tenida en cuenta. (Véase G. HUTCHINSON en: G. P. KUIPER (ed.), *The Earth as a Planet,* Chicago, 1954, pág. 389.)

[104] C. D. KEELING, *Tellus, 25,* 174, 1973.

[105] Véase M. CHATTERJEE (India), Octava Conferencia Mundial de la Energía, 1971; K. OPENSHAW, *New Scientist, 61,* 271, 1974.

[106] Sobre la base de cifras extrapoladas en relación a varios países, C. S. WONG estimó que en las zonas templadas y boreales debían de producirse anualmente unos 1,7 millones de toneladas de dióxido de carbono (que contienen unos 470 millones de toneladas de carbono), por los incendios forestales. Esto implicaría que alrededor del 4 por 100 de la sustancia orgánica producida por tales selvas resulta oxidada de tal manera; en los trópicos, y en especial en las selvas con lluvias, admite una menor incidencia de los incendios forestales; debido al tipo de agricultura alternante, sin embargo, alrededor de unos 13,5 a 19.000 millones de toneladas de dióxido de carbono se producen allí cada año (conteniendo unas 3.700 a 5.200 millones de toneladas de carbono). En virtud del crecimiento de la población, cada vez se ven implicadas, en este tipo de agricultura alternante, mayores extensiones *(Science, 200,* 197, 1978).

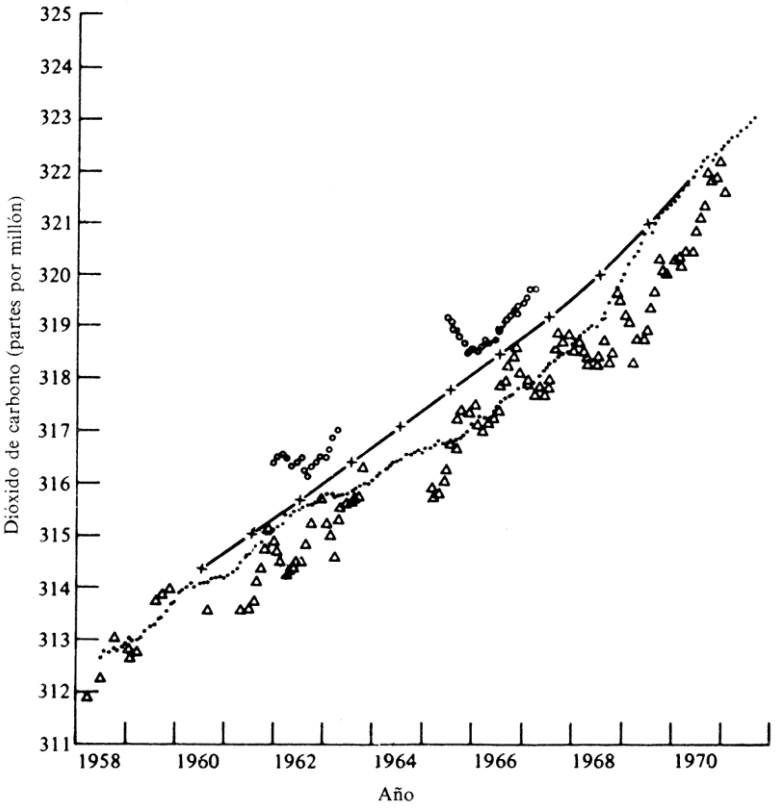


FIG. 10. Tendencia creciente de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera, según diversas fuentes de información (véase también la figura 2). + = Tomas de muestras escandinavas realizadas mediante aviones, ajustadas a 1 de julio; ● = Mauna Loa, Hawai, medias de doce meses de medidas; Δ = Polo Sur; O = Point Barrow, Alaska, medias de doce meses de medidas. (De L. MATCHA, en HESS (ed.), *Weather and Climate Modification*, pág. 693, Wiley, Nueva York, 1974.)

Metodológicamente hablando, todo ello es justificable, pues cabe distinguir entre estas últimas fuentes y la combustión del carbón, petróleo o gas natural; el consumo de combustible fósil es simplemente una forma de acelerar el ritmo biológico a largo plazo, pues elimina carbono del cuarto

depósito de reserva (pág. 21), con el consiguiente aumento del dióxido de carbono atmosférico y una disminución (muy pequeña) de la concentración del oxígeno existente en la atmósfera. Por otra parte, la quema de madera y materia vegetal es un sustitutivo del ciclo biológico de corta duración, ya que mientras no se queme más madera de la que se regenera en los bosques no dará lugar a ningún cambio en la concentración del dióxido de carbono; la quema, en este caso, sustituye a la putrefacción natural de la madera, de modo que tan sólo cuando la riqueza forestal disminuye a una velocidad superior a aquella con que es capaz de regenerarse, en cuyo caso la biomasa global decrece también, podría incrementarse la concentración del dióxido de carbono en el aire (pág. 21).

No queda claro si KEELING tuvo en cuenta totalmente esta circunstancia cuando publicó su trabajo, o si simplemente despreció la quema de madera, etc., debido a que no existían datos dignos de confianza acerca de la misma y, en consecuencia, subestimó su importancia. Pero incluso sin tener en cuenta tal foco, en caso de que realmente lo fuera, la cantidad de dióxido de carbono desprendida tan sólo en la combustión del combustible fósil viene a ser igual al doble del incremento anual de dicho gas en la atmósfera. En consecuencia, surge la cuestión de averiguar adonde va a parar el resto de tal dióxido de carbono.

La respuesta más directa e inmediata a la pregunta anterior es la siguiente: al seno de los océanos; las aguas de estos últimos contienen unas sesenta veces más de dióxido de carbono, la mayor parte en forma de iones bicarbonato, del que contiene la atmósfera. Existe un continuo intercambio gaseoso, entre la atmósfera y los océanos y, conjuntamente con reacciones químicas que tienen lugar entre los océanos y los minerales existentes en sus lechos, se establece un equilibrio; cuando tal equilibrio resulta perturbado por un incremento externo de la concentración de dióxido de carbono en el aire ocurre que los océanos absorben cantidades crecientes de dióxido de carbono (pág. 55), de modo que, a largo plazo, prácticamente, todo el dióxido de carbono desprendido en la combustión del combustible fósil acaba por concentrarse en el depósito de reserva constituido por los océanos. No obstante, lo que estamos observando es que en los últimos cien años el desprendimiento del dióxido de carbono fue tan grande que los océanos han sido incapaces de mantener su absorción al ritmo necesario; la razón reside en que para lograr una completa mezcla de sus aguas los

océanos requieren un período de tiempo relativamente grande (aproximadamente de quinientos a mil quinientos años); por lo general, los océanos poseen una capa superficial cálida, de unos centenares de metros de espesor y que está en contacto con la atmósfera, pero el resto de sus aguas, con un espesor que en promedio es de varios miles de metros constituyendo su masa principal, no tiene un intercambio directo con la atmósfera y, por tanto, con el dióxido de carbono contenido en ella; tan sólo en las regiones polares, donde las aguas superficiales son también frías y las más profundas pueden circular hasta la superficie, resulta posible el intercambio gaseoso.

El equilibrio del dióxido de carbono depende no tan sólo de las concentraciones relativas aire-agua, sino también de la composición química de las aguas y de su temperatura; cuanto más fría está el agua más dióxido de carbono puede disolverse en los océanos; bajo condiciones normales, no perturbadas, el agua del mar, en los trópicos, desprende dicho gas en el aire, mientras que en las regiones polares es absorbido por los océanos; el dióxido de carbono producido a través de la utilización de combustibles fósiles debe entrar a formar parte de este ciclo de transporte.

En este mismo contexto existe otro ciclo que también puede ser significativo; el dióxido de carbono disuelto en las aguas de lluvia o aguas terrestres forma ácido carbónico capaz de disolver a las calizas; este bicarbonato de calcio, soluble en agua, que se forma es transportado por los ríos hacia los océanos, de modo que todos los océanos del globo, por tanto, están saturados de bicarbonato cálcico, que es absorbido por diversas formas vivientes para construir sus caparazones o cubiertas protectoras, y todo este material es luego depositado, en forma de caliza, en los sedimentos. En los procesos de formación de caparazones el dióxido de carbono es de nuevo desprendido, primero en el agua y luego a la atmósfera, dependiendo del estado del equilibrio atmósfera- océano.

El hecho de que, por otra parte, el dióxido de carbono sea absorbido en grandes cantidades en la fotosíntesis, para ser de nuevo desprendido en la respiración y en los procesos de destrucción, ya fue discutido detalladamente en el capítulo 1. No resulta nada fácil seguir la pista del dióxido de carbono en el combustible fósil, a través de este complejo conjunto de ciclos interactuantes, aunque puede ayudarnos la circunstancia de que el dióxido de carbono producido en la quema de combustible fósil lleva una etiqueta especial que le distingue del dióxido de carbono atmosférico.

3.2. 80 TONELADAS DE CARBONO MARCADO

En las capas superiores de la atmósfera, y bajo la acción de la radiación cósmica, se están transformando constantemente pequeñas cantidades de nitrógeno en el isótopo del carbono de peso atómico 14, y que no debemos confundir con el carbono-13, del que hablamos en el capítulo 2 (pág. 76). La producción anual viene a alcanzar un valor promedio de 9,8 kg y, en total, existen unas 80 toneladas de carbono-14 sobre la Tierra. ¡Cuidado! No se trata de un error de imprenta, ya que no hablamos ahora de millones o miles de millones de toneladas, como hemos venido haciendo en este libro al referirnos a otras cantidades, pues ahora se trata realmente de tan sólo 80 toneladas. El carbono-14 es un isótopo radiactivo que en un tiempo relativamente corto, a escala geológica, se convierte de nuevo en nitrógeno, por desintegración de su núcleo atómico, por lo que no se produce una gran concentración o acumulación del mismo.

La desintegración radiactiva de los núcleos atómicos se produce de acuerdo con un esquema que puede ser descrito por una ley estadística, de modo que cabe predecir cuánto tiempo ha de transcurrir para que la mitad de una muestra de sustancia radiactiva se haya transformado en otro elemento; en el mismo tiempo, su propia radiactividad se ha reducido a la mitad. En el caso del carbono-14, tal tiempo, denominado período o vida media, es de 5.568 años. El carbono radiactivo es del tipo de los denominados emisores beta, ya que la desintegración de su núcleo tiene lugar mediante la emisión de un electrón; tal electrón lleva consigo una determinada cantidad de energía, de modo que puede ser identificado frente a otros electrones procedentes de otros emisores beta.

El «radiocarbono» en la atmósfera superior reacciona con el oxígeno atmosférico para dar paso a la formación de dióxido de carbono radiactivo; este último, a través de los procesos de mezcla que existen en la atmósfera, puede llegar hasta las proximidades del suelo. Las plantas pueden absorberlo durante la fotosíntesis, de modo que el carbono-14 pasa a formar parte de la materia orgánica producida; tal materia orgánica es consumida tanto por hombres como por animales, de modo que entra a formar parte de su propia sustancia orgánica. Las cantidades de carbono-14 existentes en un organismo viviente son mínimas, pues representan tan sólo alrededor de la 0,3 billonésima parte (10^{-12}) de su contenido total de carbono; sin

embargo, esta radiactividad, por pequeña que nos parezca, puede ser medida con precisión. En consecuencia, el dióxido de carbono atmosférico (en virtud de su contenido en carbono-14) lleva consigo una etiqueta o «marcado» que se transmite a todos los organismos vivos, así como a los otros depósitos-reserva implicados en los continuos procesos de intercambio gaseoso con la atmósfera.

En aquellos sitios en los que el dióxido de carbono radiactivo no se renueva constantemente, como ocurre, por ejemplo, en el fondo de los océanos, la intensidad de radiación va disminuyendo gradualmente de acuerdo con la ley de su vida media; midiendo, pues, la radiación procedente del dióxido de carbono disuelto en muestras de agua tomadas en la profundidad de los océanos es posible establecer por cuánto tiempo estuvo el gas en el agua y con qué rapidez circuló hasta tales profundidades.

Mediante el mismo método resulta posible estimar la edad de un hueso o de un pedazo de madera encontrados en alguna excavación arqueológica, ya que tan pronto como cesan el metabolismo y la incorporación de más carbono-14 se pone en marcha el reloj constituido por la desintegración radiactiva. En el caso de la madera esto tiene lugar muy pronto después de su formación, ya que deja de estar implicada en procesos metabólicos; la madera más vieja, en el interior de un árbol antiguo, contiene, por tanto, menos cantidad de carbono-14 medible del que existe en los jóvenes anillos arbóreos situados justo debajo de la corteza.

Los combustibles fósiles, prácticamente, ya no contienen ninguna cantidad de carbono-14, puesto que después de cincuenta y cinco mil años (diez vidas medias) la cantidad inicialmente existente (0,3 billonésimas partes del contenido total en carbono) ha disminuido hasta ser igual a la milésima parte de su valor ($2^{10} = 1.024$); tras ciento diez mil años la reducción habrá sido hasta la millonésima parte de tal valor; tras ciento sesenta y cinco mil años, a una milmillonésima parte, y así sucesivamente. Sabido es que los combustibles fósiles han venido yaciendo sepultados en la Tierra a lo largo de períodos del orden de algunas decenas o centenas de millones de años, por lo que, en consecuencia, el dióxido de carbono formado en la quema de estos combustibles ya no contiene carbono-14; podríamos decir que su etiqueta o marcado consiste, precisamente, en la ausencia de moléculas radiactivas.

El desprendimiento en la atmósfera de cantidades cada vez mayores de dióxido de carbono de origen industrial ha determinado una dilución medible del contenido atmosférico de carbono radiactivo, hecho que se denomina «efecto Suess» en recuerdo de quien lo descubrió [107]. Ha sido posible establecer cuál era la concentración normal de carbono radiactivo antes de la Revolución industrial, recurriendo a la medida de su contenido en los anillos arbóreos, encontrándose que en la década de los años cincuenta resultaba ser de un 2,5 por 100 inferior a la concentración de carbono-14 existente hace cien años.

Sin embargo, desde 1954 el «reloj» del carbono ha sido perturbado por la introducción en la atmósfera de la radiación neutrónica procedente de los ensayos nucleares y las bombas atómicas; tales bombas producen enormes cantidades de carbono radiactivo, y esto, en consecuencia, ha alterado la relación que había existido hasta entonces. El efecto Suess ha quedado, por tanto, ensombrecido e interferido por el del propio carbono radiactivo producido por las bombas, de modo que ahora los cambios pueden ser estudiados sobre este último carbono que ha venido a facilitar una nueva fuente de información.

Comparando estas diversas observaciones cada una de ellas con la otra, así como con otros fenómenos naturales conocidos, resulta posible tratar de elaborar un esquema general acerca de la estructura de la circulación del dióxido de carbono y desarrollar un modelo matemático; tal modelo utiliza datos relativos al tamaño de varios depósitos de reserva, tiempos de permanencia del carbono en los mismos, vida media del carbono radiactivo contenido en los gases y relaciones de intercambio entre las mencionadas reservas. Desde luego, los modelos únicamente son una representación simplificada de una realidad mucho más complicada; a pesar de ello pueden resultar útiles, a fin de detectar las ramificaciones existentes en el complicado conjunto de ciclos naturales y sus variaciones, con un grado de precisión razonable, tanto con vistas a la interpretación de hechos del pasado, como para predecir tendencias futuras.

Generalmente, cabe construir un modelo útil y realista, a base de suministrar ecuaciones y datos al ordenador e ir introduciendo alteraciones de ciertos parámetros, hasta conseguir que sea posible «predecir» correctamente hechos pasados conocidos; en nuestro caso, el modelo debe utilizar

---

[107] Véase H. E. SUESS, *Science, 122,* 414, 1955.

el contenido de dióxido de carbono, tener en cuenta el efecto Suess, así como otros importantes hechos asociados. Diversos científicos han tratado de realizar estos cálculos con distintos modelos matemáticos, y todos han llegado a la conclusión de que tan sólo cabe esperar llegar a encontrar resultados realistas si se admite que el dióxido de carbono de combustibles fósiles es absorbido no tan sólo por los océanos, sino también por la vegetación terrestre. La siguiente tabla nos muestra las proporciones en que se distribuye el dióxido de carbono, entre los diversos depósitos-reserva, según distintos autores.

TABLA 4
Distribución del dióxido de carbono producido a partir de combustible fósil entre los diversos depósitos-reserva, tal como sugieren varios autores (en tantos por ciento)

Reserva	BOLIN y BISCHOF [108] (1970)	MACHTA [109] (1972)	BACASTOW y KEELING [110] (1973)
Atmósfera	28 – 42	55	50
Vegetación terrestre	15 – 20	15	29 – 36
Océano	aprox. 50	30	14 – 21

La idea de que la vegetación puede ser capaz de absorber parte del dióxido de carbono adicional introducido en la atmósfera, y que por tanto pueda constituir una reserva de carbono, no resulta una idea demasiado inverosímil; sabemos que la productividad de las plantas en invernaderos, en los que gozan de suficiente luz, agua y nutrientes, puede incrementarse cuando crecen en un medio que contiene un cierto exceso de dióxido de carbono; es posible que este mismo efecto tenga lugar fuera del invernadero y que sea también aplicable a las tierras de cultivo con buena irrigación y fertilizantes, pero los productos agrícolas forman parte del segundo depósito-reserva (pág. 11), puesto que quedan almacenados durante un tiempo relativamente pequeño antes de que sean consumidos, y su carbono

[108] Bolin y Bischof.

[109] L. Machta en: D. Dyrssen y D. Jagner (eds.), *The Changing Chemistry of the Oceans,* Wiley, Nueva York, 1972, pág. 121.

[110] R. Bacastow y C. D. Keeling en: G. M. Woodwell y E. V. Pecan (eds.), *Carbón and the Biosphere*, Springfield, 1973, pág. 86.

resulta «quemado» por la respiración, para dar lugar de nuevo a dióxido de carbono.

De acuerdo con los modelos anteriormente mencionados, el carbono debe quedar almacenado durante un largo período de tiempo; por tanto, la distribución calculada puede tan sólo tener un cierto realismo si el tercer depósito, es decir, el contenido mundial de madera y humus, aumenta de tamaño. Sin embargo, en la riqueza forestal no es, por lo general, la cantidad de dióxido de carbono el factor limitador, sino más bien la abundancia de luz, agua y nutrientes; esto resulta especialmente cierto en las selvas tropicales, que ya alcanzaron el denominado clímax o condiciones adecuados; la selva está cubierta totalmente de una capa o dosel de hojas, de modo que toda la luz utilizable es aprovechada y, en consecuencia, el factor determinante para que sea posible un nuevo desarrollo vegetal es el problema de hallar «un puesto al sol»; en consecuencia, aunque la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera aumentara, la situación no resultaría prácticamente muy alterada. Desde un punto de vista ecológico resulta, por tanto, difícil pensar en qué lugar podríamos encontrar la vegetación que, de acuerdo con los autores de los modelos, sería capaz de eliminar o absorber alguna parte de este exceso de dióxido de carbono. En opinión de WOODWELL, WHITTAKER y los coautores de un trabajo sobre el problema del dióxido de carbono, «No tenemos ninguna prueba de que se produzca realmente un incremento en la capacidad almacenadora de las florestas naturales, motivada por el aumento del contenido del dióxido de carbono» [111].

Las exigencias de meteorólogos y geofísicos son, más bien, modestas; en el supuesto de que la quema de combustible fósil fuera la única responsable (o, por lo menos, la causa primordial) del aumento del contenido del dióxido de carbono en la atmósfera, la cantidad de este último que falta, es decir, que no ha permanecido en la atmósfera entre los años 1860 y 1970, viene a ser de unos 150.000 millones de toneladas; de esta cifra, de acuerdo con el modelo, las dos terceras partes fueron a parar a los océanos, dejando el resto, de unas 50.000 toneladas de dióxido de carbono (equivalente a 14.000 toneladas de carbono), para ser captadas por la vegetación terrestre. La biomasa que representa la riqueza forestal global contiene más de

[111] G. M. Woodwell, R. H. Whittaker, W. A. Reiners, G. E. Likens, C. C. Delwiche y D. B. Botkin, *Science, 199,* 141, 1978.

700.000 millones de toneladas de carbono y de 1 a 3 billones de toneladas están almacenadas en el humus. Así pues, si estas dos reservas de carbono aumentaron en los últimos cien años, tal vez en un 1 por 100 cada una (variación que resulta inferior a la precisión de las medidas ecológicas), este dato podría justificar la cantidad de dióxido de carbono «desaparecido», con lo cual los autores de modelos podrían sentirse satisfechos.

Que tal pueda haber sido el caso es un hecho que no pueden rechazar los ecólogos, aunque realmente desconozcan la existencia de un mecanismo que pueda considerarse capaz de justificarlo. Por tanto, el problema podría considerarse como resuelto si la riqueza forestal hubiera persistido en su estado normal; pero, tal como hemos descrito en el capítulo 1 de este libro, éste no ha sido precisamente el caso real, ya que, de acuerdo con los biocientíficos, tanto la biomasa como la cantidad de humus natural han venido disminuyendo en forma radical, en virtud de la limpieza y tala forestales; aparte, pues, de la quema del combustible fósil, otras grandes cantidades de dióxido de carbono pasaron también a la atmósfera procedentes de este último foco mencionado.

3.3. ¿ESTA AUMENTANDO O DISMINUYENDO LA BIOMASA MUNDIAL?

En una conversación sostenida con G. M. WOODWELL durante la Conferencia de Dahlem, me informó de que LESTER MACHTA, conocido meteorólogo, le había preguntado, en cierta ocasión, de forma casual, si él era de la opinión de que los bosques serían capaces de incrementar su producción fotosintética, en caso de que aumentara el aporte de dióxido de carbono.

«Casi sin pensarlo le contesté —me dijo WOODWELL— que tal cosa podría ocurrir en ciertos bosques en los que no hubiera limitaciones de humedad ni de nutrientes; pero esta conjetura hecha en una conversación ha venido siendo ampliamente citada por meteorólogos, así como por otras personas implicadas en la elaboración de modelos relativos al balance mundial del carbono. Por mi parte he llegado a la conclusión de que en

aquel momento me equivoqué [112]; pero incluso en el supuesto de que existieran zonas forestales capaces de producir mayor cantidad de sustancia orgánica, al incrementar el contenido del dióxido de carbono en la atmósfera tales aumentos resultarían insignificantes a escala mundial. Los modelos de MACHTA y de otros tan sólo pueden ser correctos en el caso de que la biomasa *total* de la riqueza forestal mundial haya aumentado en el transcurso de los últimos cien años; esto resulta muy dudoso para mí, porque las variaciones habidas en las zonas forestales en virtud de las talas sufridas han tenido mucha mayor influencia en la magnitud de la biomasa mundial, y por tanto sobre la composición de la atmósfera, que cualquier posible incremento registrado en la actividad de la fotosíntesis. La conclusión debe ser que el incremento en el contenido del dióxido de carbono atmosférico está determinado no tan sólo por la quema de combustibles fósiles, sino también por la emisión de dióxido de carbono que se produce en la destrucción forestal y del humus.»

El supuesto de MACHTA y otros especialistas en ciencias de la Tierra (meteorólogos, geofísicos, oceanógrafos, etcétera), en el sentido de que las plantas verdes almacenaran parte del dióxido de carbono producido industrialmente tan sólo resultaría cierto si la cantidad total de materia orgánica sobre la superficie terrestre, conjuntamente con la materia total en forma de humus, experimentase un aumento. No es solamente WOODWELL quien está en desacuerdo con tal hipótesis, sino también la mayor parte de los científicos de ramas biológicas (botánicos, ecólogos, expertos forestales, etc.). Por otra parte, la biomasa mundial (incluyendo al humus) solamente pudo haber disminuido en cantidad si los océanos hubieran absorbido más dióxido de carbono, en cuantía apreciable, del que hasta ahora se supone o también en el caso de que existiera otra sima desconocida capaz de absorberlo; sin embargo, ambas hipótesis son consideradas muy improbables por la mayoría de los expertos en ciencias de la Tierra.

El hecho de que existan dos modelos distintos en relación al balance mundial del carbono, cada uno de los cuales es aceptado por científicos de una disciplina, pero en manifiesta contradicción con el modelo propuesto por los científicos de otra rama de la ciencia, se planteó claramente durante

[112] Véase también G. M. WOODWELL y R. A. HOUGHTON en: W. STUMM (ed.), *Global Chemical Cycles and their Alterations by Man*, Berlín, 1977, pág. 69.

el Simposio sobre «El carbono en la biosfera», que se celebró en Brookhaven, cerca de Nueva York, en el año 1972 [113]. La discusión alcanzó, no obstante, su punto crítico en la Conferencia de Dahlem, en noviembre de 1976, y ha continuado, desde entonces, en el transcurso de otras conferencias internacionales de carácter interdisciplinar [114].

Naturalmente, los científicos implicados en tal disputa comenzaron defendiendo su punto de vista y buscando los puntos débiles en los argumentos esgrimidos por sus oponentes. No obstante, cuando el punto de vista opuesto viene siendo reiterado con argumentación convincente cabe empezar a considerar que tal vez pudiera existir algún punto débil y supuestos no comprobados en el modelo propio, y que tal vez este último requiera una revisión, por lo menos en ciertos aspectos.

Tal situación fue a la que se llegó a la 11 Reunión de trabajo de la IIASA, sobre «Dióxido de carbono, clima y sociedad», que se celebró en febrero de 1978; en esta reunión, la brecha existente entre ambas partes estaba perfectamente delimitada, pero hubo una bien definida tendencia a lograr una aproximación, ya que todo el mundo estaba de acuerdo en que tan sólo cuando el ciclo básico del carbono fuera completamente comprendido iba a resultar posible elaborar recomendaciones, significativas y adecuadas, con vistas a los planes energéticos presentes y futuros.

«Ahora sabemos que conocemos mucho menos de lo que creíamos saber hace unos pocos años acerca del ciclo del carbono», dijo BERT BOLIN en una de las conferencias de introducción, y luego explicó que en la actualidad, en Estocolmo, su grupo de trabajo está tratando de elaborar un

---

[113] Véase WOODWELL y PECAN (eds.).

[114] ERDA, reunión de trabajo sobre *Efectos ambientales del dióxido de carbono procedente del consumo de combustibles fósiles,* Miami, marzo, 1977. (Proceedings, W. P. ELLIOT y L. MACHTA (eds.), US Department of Energy, Washington, 1977.)

Conferencia ICSU-SCOPE, sobre *El ciclo global del dióxido de carbono,* Ratzeburg, República Federal Alemana, abril, 1977. (Proceedings, B. BOLIN, E. T. DEGENS, S. KEMPE y P. KETNER (eds.), Wiley, Chichester, Nueva York, 1978.)

IIASA reunión de trabajo sobre *Carbón Dioxide, Climate, and Society,* Badén, Austria, febrero, 1978. (Proceedings, J. WILLIAMS (ed.), Pergamon Press, Oxford, 1978.)

Conferencia sobre *El impacto del hombre sobre el clima,* Berlín, junio, 1978. (Proceedings, W. BACH (ed.), Elsevier, Amsterdam, 1979.)

modelo del ciclo del carbono mucho más sofisticado que el que anteriormente habían venido utilizando, con la incorporación de conocimientos procedentes de todas las ramas de la ciencia y utilizando datos que habían sido comprobados y contrastados, con toda la información relativa al problema de que actualmente se disponía, incluyendo modelos de ciclos correspondientes a otros elementos, puesto que éstos deben estar de acuerdo con el modelo que se elabore para el del carbono [115].

Cuando tales conflictos surgen, los biocientíficos siempre se encuentran en desventaja frente a los meteorólogos, geólogos y otros expertos en ciencias de la Tierra, puesto que los primeros carecen de datos numéricos fidedignos; el único extremo sobre el que no caben dudas es acerca de las tendencias a largo plazo, ya que es perfectamente creíble que hace tres mil años, e incluso hace mil años, existía mayor riqueza forestal de la que tenemos hoy día, pero en cambio, ¿qué variaciones tuvieron lugar en los últimos cien años y en particular cuáles han ocurrido a partir de 1958, cuando se iniciaron las primeras determinaciones precisas de las concentraciones de dióxido de carbono, en Mauna Loa? «Los datos no son tan buenos como cabría suponer —escribe WOODWELL—, pero parecen ser indiscutibles para quienes están familiarizados con ellos» [116].

Sin embargo, subsiste el hecho de que los biocientíficos son incapaces de establecer, con algún grado de certeza, cuál es la magnitud real de la biomasa actual existente en el globo; al evaluar tal cuantía, los diversos autores dan cifras ampliamente distintas; las estimaciones de WHITTAKER y LINKENS, que por lo general se considera que son las que ofrecen mayor confianza, y que reiteradamente son citadas en este libro (véase la tabla 2), se refieren a la situación existente en la década de los años cincuenta, por lo que algunas de sus cifras pueden considerarse hoy día obsoletas. De los 17 millones de kilómetros cuadrados de selvas tropicales con lluvias, dados en dicha tabla, en 1975 subsistían tan sólo 9,5 kilómetros cuadrados, de acuerdo con una nota de prensa dada por el World Wildlife Fund [117]. De amplias zonas del globo no existe información útil acerca de los cam-

---

[115] Véase B. BOLIN en: WILLIAMS (ed.), pág. 41; y A. BJORKSTROM, *ibíd.*, pág. 97.

[116] WOODWELL, *Scientific American*.

[117] Citado por WOODWELL y cols., *Science*.

bios habidos por repoblación, a lo largo de los últimos cien años, y ninguna, en absoluto, en relación a si el aumento en la concentración del dióxido de carbono atmosférico determinó algún incremento en el ritmo de crecimiento de la riqueza forestal en alguna parte del globo.

Es de esperar que, en el futuro, al poder disponer de las observaciones procedentes de satélites, se logrará obtener información exacta en relación a los cambios que tengan lugar en las zonas cubiertas por distintos tipos de vegetación; entonces será posible, en unas pocas décadas, decidir acerca de si el límite septentrional de las zonas forestales se está realmente desplazando hacia el norte, tal como supone WOODWELL (pág. 20).

Durante la reunión de la IIASA, le preguntó a BERT BOLIN: «¿Hay alguna posibilidad de que exista un mecanismo de retroalimentación que estuviera operando en el límite norte de la zona forestal? En un calentamiento a escala mundial de la atmósfera, determinada por un incremento en su contenido de dióxido de carbono, dicho límite septentrional de las zonas forestales podría desplazarse hacia el norte, dando como resultado un aumento en la extensión del área y biomasa de las zonas forestales boreales; en la fotosíntesis se utilizaría mayor cantidad de dióxido de carbono y con ello su concentración en la atmósfera disminuiría, con lo cual, por lo menos, el calentamiento global se haría más lento».

«Su razonamiento, en principio, resulta correcto —fue la respuesta—; sin embargo, tengo mis dudas de que pudiera tener lugar un corrimiento de tal zona climática hacia el norte, en una parte del globo, sin que llevara asociados desplazamientos de zonas climáticas en otras partes, de modo que estos últimos pudieran tener un efecto opuesto sobre la reserva total de biomasa.»

Le repliqué que los cambios de temperatura, como tendremos ocasión de ver más adelante en este libro, son mucho más pronunciados en las altas latitudes del hemisferio norte que en latitudes bajas, y que, por tanto, también parece posible que ocurrieran corrimientos del borde septentrional de la zona forestal, sin que, simultáneamente, se produjeran otros de las zonas con vegetación de bajas latitudes.

«Realmente, podría ser así —dijo BOLIN—; pero un calentamiento global aceleraría el metabolismo de las bacterias que descomponen los desperdicios y el humus; de modo que la producción de dióxido de carbono resultaría incrementada, con lo cual podría también darse un efecto opuesto.»

ULRICH HAMPICKE, que pertenece al grupo «Ambiente, Energía y Sociedad», de la Universidad de Essen, en la República Federal de Alemania, ha llevado a cabo un cálculo aproximado acerca de la importancia relativa de estos dos efectos, y me manifestó por carta que había llegado a la conclusión preliminar de que ambos eran probablemente casi iguales en magnitud, por lo que resultaba lógico que se compensaran mutuamente.

El programa mundial de observaciones mediante satélite, que antes mencionábamos, sólo puede facilitarnos información acerca de los cambios que se produzcan en las *áreas* de los diversos tipos de vegetación; aunque tal información resulta ser muy interesante, no es desde luego, y por desgracia, la que realmente se necesita. Las informaciones facilitadas por las medidas llevadas a cabo por los satélites no permitirán deducir si la biomasa, dentro de una cierta área, está variando y, desde luego, nada nos permitirán saber acerca de la cantidad de humus.

«Durante largo tiempo ha sido infravalorada la importancia de la reserva-depósito constituida por el humus —me dijo el ecólogo americano W. A. REINERS, en la Conferencia de Dahlem—, y hace ya cuatro años que en el Simposio de Brookhaven fue ampliamente sugerida la idea de que tal reserva podría contener entre las 700 y las 800 mil millones de toneladas. Precisamente en tal conferencia yo llamé la atención hacia el hecho de que esta reserva de carbono podría ser hasta diez veces mayor, si el valor estimado por DELWICHE, en relación a la cantidad de nitrógeno en los suelos, fuera bastante correcto» [118].

«¿Quiere usted sugerir con ello que, puesto que las sustancias orgánicas poseen una proporción relativamente fija entre el contenido en carbono y de nitrógeno, hay que suponer que la misma proporción debe también ser válida para el humus?»

«Sí, exactamente, y debido a la amplia discrepancia que existe entre tales estimaciones, sugerí la necesidad de que se realizaran nuevas medidas, con objeto de poder establecer, con mayor precisión, la magnitud de la reserva en el humus. Desde entonces, distintos científicos han estado trabajando en este problema, y sus resultados son para mí bastante más aceptables. Aquí, en mi trabajo, me refiero a los resultados obtenidos en un estudio hecho por W. H. SCHLESINGER, trabajo que actualmente está en prensa, según los cuales se estima que la reserva en humus contiene 1,5

[118] W. A. REINERS en: WOODWELL y PECAN (eds.), pág. 303.

billones (10^{12}) de toneladas de carbono. Por su parte, BOLIN cita un trabajo de H. L. BOHN, en el que se sugiere que tales reservas podrían muy bien ser de alrededor de los 3 billones de toneladas» [119].

«¿Y en qué forma afectan al humus los cambios introducidos por el hombre en la vegetación?», le pregunté.

«Hablando en general, le diría que en muy mala forma; el cambio de zona forestal a campo de cultivo significa que el suelo es arado y aireado, con aumento de la oxidación; al suprimir la cobertura forestal aumenta la temperatura del suelo, lo que determina una intensificación del ritmo respiratorio de los microorganismos que están en los suelos. Los productos agrícolas son recogidos y distribuidos, por lo general, en zonas alejadas de aquellas en las que se cosecharon y, por consiguiente, la sustancia orgánica no se reintegra al mismo suelo, de modo que, de no plantarse legumbres, el contenido en nitrógeno en el suelo puede quedar reducido en un 50 por 100, y puesto que el nitrógeno se encuentra, por lo general, en algunos compuestos orgánicos que también contienen carbono, la cantidad de este último decrecería en la misma proporción. Algo análogo ocurre también cuando los pantanos o páramos son desecados para ser transformados en zonas de labrantío. Tomando las medidas oportunas resulta posible mantener, e incluso incrementar ligeramente, el contenido de humus cuando las zonas forestales se transforman en otras de pastos; por lo general, la erosión aumenta notablemente tras la eliminación por limpieza o tala de los bosques, y el material constituyente del humus es eliminado por la acción del viento y del agua, con lo cual la tierra fértil puede gradualmente transformarse en un desierto.»

«¿Por tanto, usted es de opinión de que la cantidad de humus existente en el globo está actualmente disminuyendo?»

«Sin duda alguna; pero incluso me atrevería a ir un poco más allá y afirmar que existe una relación directa entre el ritmo de crecimiento de la población mundial y la disminución de la cantidad de humus.»

No obstante, el humus «perdido» en los procesos de erosión no resulta, necesariamente, oxidado. En una conversación sostenida durante la reunión de trabajo II AS A, el ecólogo profesor HELMUT LIETH, quien des-

---

[119] W. H. SCHLESINGER, *Annual Review of Ecological Systems,* 8, 51 (1977); H. L. BOHN, *Soil Science Soc. Am. J.*, 40, 468, (1976).

pués de estar unos años en Estados Unidos ha regresado ahora a su Alemania natal, se refirió a los ríos «negros» o parduzcos del Brasil, Siberia y otros lugares, diciéndome que «El color viene determinado por el humus, de modo que si se eliminaran las selvas existentes en las zonas de captura de tales ríos, sus aguas, presumiblemente, transportarían todavía mayor cantidad de material oscuro; de todos modos, me inclino a pensar que una considerable proporción de tal humus llega al mar sin haber sufrido oxidación, depositándose allí, en forma de carbono reducido, junto a los sedimentos del océano. En consecuencia, no todo el humus perdido tiene forzosamente que determinar una nueva carga de dióxido de carbono en la atmósfera» [120].

3.4. ¿QUE ES LO QUE PODEMOS CONOCER A PARTIR DE LOS ANILLOS ARBOREOS?

En los últimos años los biocientíficos han recibido una notable ayuda de una recién nacida rama de la investigación que trata de analizar las pasadas características del ciclo del carbono, mediante el estudio de los cambios registrados en la abundancia relativa de los distintos isótopos del carbono, en los anillos que anualmente se desarrollan en los árboles; como este tipo de investigación recurre a métodos de las «ciencias exactas» tiene gran probabilidad de ser considerada como «más respetable», por los geofísicos y otros expertos en ciencias de la Tierra, que las meras «vagas evaluaciones» de ecólogos y expertos forestales.

Como anteriormente fue mencionado (pág. 78), en la fotosíntesis el carbono es seleccionado de modo que el isótopo ligero, el carbono-12, resulta preferido; en consecuencia, todos los compuestos de carbono de origen biológico, ya sea procedente de plantas, maderas, humus o combustibles fósiles, así como el dióxido de carbono producido por su quema, respiración o desintegración de tal carbono biológico, contiene una cantidad de los isótopos más pesados inferior a la que existe en el dióxido de carbono atmosférico. Además, el carbono-14, que es radiactivo, pierde la mayor parte de su actividad en unos cien años, de modo que, tal como dijimos anteriormente, los combustibles fósiles, al ser mucho más antiguos, apenas

[120] Véase también S. KEMPE en: BOLIN y cois, (eds.), Conferencia de Ratzeburg.

si contienen algo de tal isótopo; en cambio, tanto en maderas, como en humus, hay tan sólo una pequeña variación respecto a la relación isotópica correspondiente a la atmósfera libre. Así pues, existen tres reservas distintas de carbono capaces de ser distinguidas, entre sí, por sus respectivas abundancias relativas en isótopos de carbono.

Cuando, procediendo de alguno de estos depósitos entran en la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono, se altera la proporción existente entre los diversos isótopos del carbono, y tal variación se conserva y manifiesta en los anillos arbóreos del año en que tal cambio se produjo. A partir de un análisis de tales anillos se puede demostrar que las abundancias relativas de los isótopos del carbono variaron en el pasado, y a partir de tal dato cabrá evaluar retrospectivamente la cantidad de dióxido de carbono que fue desprendido en la atmósfera, procedente de los diversos depósitos de reserva.

En la práctica, todo esto no resulta por ahora tan sencillo, ni tan exacto como parece; en este nuevo campo de investigación los hombres de ciencia se encuentran todavía en la fase de ir calibrando sus equipos de medida; por el momento no sabemos aún a ciencia cierta con qué grado de precisión los anillos arbóreos reflejan los cambios habidos en la atmósfera, ni tampoco podemos explicar por qué distintas muestras, tomadas del mismo anillo, y del mismo árbol, por no mencionar el caso en que se trata de árboles diferentes, a menudo presentan una considerable dispersión en relación a los datos que se obtienen respecto al contenido isotópico de carbono. Por el momento, quienes trabajan en este campo están todavía tratando de poner a punto una técnica que les permita obtener una información significativa, a partir de señales que son tan débiles que casi llegan a confundirse con el ruido de fondo. Por esta razón es fácilmente comprensible que diversos grupos que se ocupan del análisis de estos niveles de señal tan bajos lleguen a obtener resultados que presentan ciertas discrepancias mutuas. En la reunión de la IIASA celebrada en 1978 se mencionó que era de esperar que este tipo de problemas iniciales podrían ser superados en los próximos cinco a diez años, y que entonces, paralelamente a las evaluaciones elaboradas por los ecólogos, se conseguirá disponer de un método independiente y de confianza capaz de facilitar información acerca del tamaño real de la fuente biológica del dióxido de carbono.

Entre tanto, resultó que tal optimismo había sido prematuro; de acuerdo con un informe de MINZE STUIVER [121], uno de los maestros en este nuevo arte de análisis de los anillos arbóreos, presentado en la reunión de trabajo de Dahlem sobre Química atmosférica, en mayo de 1982 [122], las relaciones isotópicas del carbono en tales anillos están reflejando no sólo cambios globales en dichas relaciones correspondientes al dióxido de carbono atmosférico, sino también otras variaciones tales como las fuentes locales de combustible fósil que eran quemadas, así como factores ambientales: precipitación, temperatura, intensidad luminosa, etc. Afortunadamente, no resulta necesario perseguir hacia atrás en el pasado a cada uno de tales factores, puesto que tenemos un registro del propio crecimiento del árbol en forma de las anchuras de los propios anillos anuales. Así pues, según STUIVER, las relaciones o valores isotópicos de un anillo arbóreo deben ser consideradas en relación con la superficie anual del anillo; de esta manera se obtiene una curva «normalizada» que ofrece menor dispersión y probablemente se acerca más a la realidad que las anteriormente obtenidas. A pesar de todo, al comparar curvas «normalizadas» de distintos árboles de diversas partes del mundo existe todavía una considerable variabilidad.

Todos los árboles examinados muestran una tendencia general a una disminución del carbono-13 presente en la atmósfera a lo largo de los últimos cien años; esto está en buen acuerdo con el incesante incremento en la utilización de combustibles fósiles; la amplitud de tales cambios del carbono-13, sin embargo, presenta una considerable variación, ya que está comprendida entre un 0,2 a un 1,7 por 1000; mientras los valores más altos parecerían indicar que cantidades sustanciales del dióxido de carbono habrían sido lanzadas a la atmósfera, como resultado de la destrucción forestal, los más bajos indicarían que la biosfera, en conjunto, habría sido más bien una sima que una fuente del citado dióxido, a lo largo del presente siglo.

De modo, pues, que la evidencia de los anillos arbóreos, por ahora, debe considerarse como dudosa, aunque, sin embargo, exige una reconsideración del valor preindustrial de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera que originalmente se había estimado en unas 290 ppm. El

---

[121] M. STUIVER, *Science, 199,* 253 (1978).

[122] Véase E. D. GOLDBERG, ed. Springer-Verlag, Berlín-Heidelberg- Nueva York (en prensa).

análisis de los anillos, lo mismo que el de las de burbujas de aire atrapadas en los hielos del glaciar antártico [123], indican que sería mucho más realista aceptar un valor de 260 a 270 ppm.

Estas conclusiones, por tanto, vienen a dar nuevo peso a las medidas que se hicieron al principio del presente siglo y que daban valores de alrededor de las 270 ppm; este último dato venía siendo tenido como impreciso, debido al equipo deficiente que por aquel tiempo fue empleado, pero tal vez resulte más preciso de lo que previamente se estimaba [124].

3.5. LA BUSQUEDA DE LA SIMA QUE FALTA

De acuerdo con las pruebas presentadas en la Conferencia de Dahlem por GEORGE WOODWELL, el ritmo anual a que se desarrollan la limpieza y tala de las selvas tropicales se sitúa entre el 1 y el 2 por 100 de su superficie total en 1950 [125]. Otros autores (algunos de ellos citados en las páginas 26 a 30 de este libro) ofrecen evaluaciones análogas. En el supuesto de que la cantidad anual y global de leña obtenida se cifrara tan sólo en un 1 por 100, de la cual las dos terceras partes fueron transformadas en dióxido de carbono, en un corto período de tiempo (el resto queda almacenado como madera), el desprendimiento mundial, por año, del citado gas sería de 18.000 millones de toneladas (5.000 millones de toneladas de carbono), cifra que resulta ser análoga a la que se produce en virtud de la quema de combustibles fósiles.

«¿No cree usted que estos dos tercios parecen ser una estimación demasiado baja, cuando uno tienen en cuenta la quema de rastrojos en la agricultura, la cantidad de madera usada como combustible, y la producción de papel para imprenta, así como la de otros artículos de corta vida hechos a base de madera?», le pregunté a WOODWELL.

Levantando sus cejas me miró con sorpresa, pues a lo largo de toda la conferencia había sido acosado por los que pretendían convencerle de que

---

[123] C. LORIUS, Laboratoire de Glaciology, Grenoble; comunicación personal.

[124] H. BROWN y F. ESCOMBE, *Proceedings of the Royal Society*, Londres, Ser. B, *76*, 118, 1905.

[125] G. M. WOODWELL y R. A. HOUGHTON en: STUMM (ed.); WOODWELL y WHITTAKER y cols., *Science*.

sus evaluaciones daban lugar a cifras *demasiado altas*, y ahora le sorprendía el que alguien, por el contrario, le preguntaba ¡si tal vez no resultaban demasiado bajas!

«Seguramente tiene usted razón —me replicó—, pero en realidad lo que ocurre es que yo trataba de presentar unas estimaciones muy prudentes.»

En su intento de mantenerse del lado conservador, WOODWELL había hecho también unas hipótesis más bien generosas, en relación a la cantidad de carbono almacenado en la vegetación secundaria, tras la destrucción de las zonas forestales primarias, y al mismo tiempo aceptando unas evaluaciones, más bien bajas, en cuanto a la cantidad de humus oxidado cuando tiene lugar la tala de las zonas forestales. Por tanto, él llegaba a la conclusión de que el tamaño de la fuente del dióxido de carbono biosférico resulta ser, probablemente, del orden de 15 a 30.000 millones de toneladas de dióxido de carbono (de 4 a 8.000 toneladas de carbono) anuales.

«Y acaso la cifra puede que sea considerablemente mayor —añadió—, pero en cambio es sumamente improbable que sea muy inferior.»

Si en vez de mantener criterios tan conservadores hubiera sido algo más liberal en sus evaluaciones, a su juicio muy bien, hubiera podido haber llegado a cifras tan elevadas como la de unos 66.000 millones de toneladas, anuales (18.000 millones de toneladas de carbono); esto representaría tres veces y media la cuantía del procedente de la fuente formada por el combustible fósil [126]. BILL REINERS me dijo, durante la Conferencia de Dahlem, que él juzgaba que las evaluaciones máximas de WOODWELL eran demasiado altas; a pesar de ello, más tarde fue coautor de un trabajo, publicado por WOODWELL, WHITTAKER y otros, en la revista *Science*, que contenía una amplia gama de posibles valores, ya que el mismo está de acuerdo con la línea argumental principal, en el sentido de que la biosfera no es una sima para el dióxido de carbono, sino que más bien constituye una fuente de considerable importancia.

No es difícil imaginar cuál es la impresión que embarga a los científicos, expertos en ciencias de la Tierra, cuando se ven obligados a enfrentarse con unas estimaciones que presentan tan amplio margen de discrepancia; ¿cómo van a poder incluir cifras y datos dignos de confianza en

[126] *Ibíd.*

sus cálculos a base de modelos, cuando los propios biocientíficos son incapaces de ponerse de acuerdo acerca de un valor único? De todos modos, subsiste el hecho de que incluso la mínima evaluación hecha por los biólogos acerca del tamaño de la fuente biosférica de dióxido de carbono no resulta muy inferior a la cantidad de dicho gas que puede desprenderse de la quema de combustibles fósiles. En consecuencia, cuando se tienen en cuenta todas las posibles fuentes, resulta que mucha mayor cantidad de dióxido de carbono se desprende en la atmósfera, de la que hasta ahora se había supuesto en todos los cálculos realizados a base de modelos. Sin embargo, la cantidad de tal gas en la atmósfera no va a cambiar por el simple hecho de dar satisfacción a los elaboradores de modelos, siendo, por cierto, tal dato uno de los pocos que no se discuten en todo este complicado juego.

Las medidas precisas que se han venido realizando a lo largo de los últimos veinte años ponen de manifiesto un continuo aumento, que en la actualidad está lugar a un ritmo de unos 8 a 10 mil millones de toneladas de dióxido de carbono, por año (de 2,2 a 2,7 mil millones de toneladas de carbono). En consecuencia, surge la cuestión: ¿qué se hace del resto? Incluso las evaluaciones más moderadas de los biocientíficos sugieren que tal resto no es de 10.000 millones de toneladas, que es lo que suponen los especialistas en ciencias de la Tierra, sino más bien del orden de los 25.000 millones de toneladas de dióxido de carbono (7.000 millones de toneladas de carbono). Los expertos en oceanografía que estuvieron en la Conferencia de Dahlem declararon que los océanos no podrían absorber posiblemente más allá de una tercera parte de la citada cantidad, de modo que comenzó la búsqueda de alguna otra sima capaz de captar al dióxido de carbono.

Una sugestión fue la de que podría existir un flujo más intenso de carbono dirigido hacia los sedimentos, es decir, lo que hemos designado como el cuarto depósito-reserva; sin embargo, de acuerdo con SCHIDLOWSKI y sus colegas (pág. 61), el ritmo anual de la sedimentación del carbono de origen biológico es, a lo sumo, de unos 150 millones de toneladas (lo que corresponde a unos 500 millones de toneladas de dióxido de carbono), mientras que GARRELS y sus colegas dan una cifra todavía menor. Resulta muy improbable que tal ritmo pudiera aumentar, aun en el caso de que hubiera mayor cantidad de dióxido de carbono disponible, ya que en los océanos lo que viene a limitar el crecimiento de algas no es precisamente

la cantidad de dióxido de carbono, sino el escaso suministro de nitrógeno y fósforo.

El oceanógrafo canadiense C. S. WONG propuso posteriormente que tal vez la cantidad de carbono orgánico sepultado entre los sedimentos en las *zonas costeras* del mar haya sido subestimada; en particular sugirió que las aguas del Ártico, «donde un corto período de producción se combina con un gran aporte de material sedimentario procedente de los continentes, pudiera resultar muy favorable al respecto», tanto más puesto que la desintegración resulta lenta en las frías aguas polares. Introduciendo supuestos muy amplios llegó a la conclusión de que el ritmo anual de sedimentación mundial podría ser de 1.200 millones de toneladas de carbono (equivalentes a 4.400 millones de toneladas de dióxido de carbono) [127]. Sin embargo, esto justificaría tan sólo una cuarta parte del déficit, por lo que sugiere que debe tratar de encontrarse otra posible sima.

Los participantes en la Conferencia de Dahlem se plantearon luego la cuestión de que si, tal vez, el exceso de fertilización (eutroficación) de los lagos de agua natural, observado en varias ocasiones, pudiera constituir una sima, para el exceso de carbono, aunque cálculos aproximados demuestran que tal efecto tan sólo sería capaz de constituir una sima del orden de unos pocos tantos por ciento de la que se requiere.

Así pues, fueron propuestas diversas hipótesis, pero tal como resumieron WOODWELL, WHITTAKER y sus colegas, en un trabajo publicado en la revista *Science*, «aunque pocas de ellas pueden ser categóricamente rechazadas, parece ser que no existe ninguna sima única importante del carbono, es decir, equivalente a la cantidad del mismo que se estima desprendida, exceptuando los propios océanos» [128]. Por otra parte, si la biosfera ha sido realmente una fuente de dióxido de carbono, en lugar de una sima, y de no existir ninguna otra sima importante, sería preciso recurrir a un modelo en el que los océanos fueran capaces de incorporar al carbono en una proporción de unas cinco veces mayor de lo que hasta el presente ha venido admitiéndose. No obstante, A. LERMAN, uno de los portavoces del grupo en la Conferencia de Dahlem, declaró: «Resulta difícil comprender cómo es

[127] WONG (véase nota 106).

[128] Woodwell y cols.

posible que las estimaciones anteriores, relativas a la capacidad de incorporación de dióxido de carbono por parte de los océanos, puedan ser erróneas y en un factor cinco.»

CHRISTIAN JUNGE, conocido experto en química del aire, expresó su desacuerdo al manifestar, durante la sesión de clausura de la conferencia, que: «Los océanos constituyen un enorme depósito-reserva, puesto que contienen unas sesenta veces la cantidad de dióxido de carbono existente en la atmósfera; con tal de que el ritmo a que se realiza la mezcla, entre las aguas superficiales y profundas, fuera tan sólo un poco superior del supuesto, a mi juicio, todas las discrepancias quedarían resueltas. Por el momento, estamos todavía muy lejos de poder ser capaces de definir las estructuras a escala mundial para la circulación e intercambios gaseosos con un grado de precisión y confianza tales que fuéramos capaces de eliminar la posibilidad de que los océanos puedan incorporar una cantidad mucho mayor de dióxido de carbono de la que ha sido postulada en los modelos que hasta la fecha se han venido utilizando.»

En la reunión de trabajo de IIASA, en febrero de 1978, WALLACE BROECKNER, como portavoz de los oceanógrafos, tuvo una postura mucho más conciliatoria que la que había mantenido durante la Conferencia de Dahlem cuando admitió que, en primera aproximación, no es precisa la existencia de una sima biosférica del dióxido de carbono, y que incluso sería posible que existiera una pequeña fuente biosférica, aunque no del tamaño tan grande como el que suponían WOODWELL y sus colegas.

«¿Es usted capaz de imaginar alguna sima importante del dióxido de carbono distinta de las que hasta ahora fueron consideradas?», le pregunté durante un descanso entre sesiones.

«Personalmente, lo dudo —fue su respuesta—, pero GARRELS sugirió recientemente que los carbonatos de magnesio, en los océanos, podrían constituir tal sima.»

Así pues, escribí al profesor GARRELS preguntándole acerca del tema, y ésta fue su respuesta: «En relación a las simas oceánicas, yo he sugerido la posibilidad de que los carbonatos de magnesio pueden estar aproximadamente en equilibrio en la superficie de las aguas marinas; en tal caso, al aumentar el dióxido de carbono se disolverían, a pesar de la calcita y el aragonito no pueden hacerlo porque el agua marina superficial está saturada respecto a ellos; que esto pueda constituir en principio una sima no

ha sido nunca ni adecuadamente comprobado, ni cuantativamente estimado. Otra posible sima es la disolución de calcitas con bajo contenido en magnesio y aragonitos, en aguas de latitudes altas; ALEXANDERSSON, de Suecia, ha demostrado que en los 100.000 kilómetros cuadrados comprendidos en la zona del Scagerrak-Kattegat las aguas presentan una superficie agresiva de dicho tipo» [129].

Otra nueva sima terrestre fue sugerida, durante la reunión de la IIASA, por KARL ERIK ZIMEN, químico nuclear sueco que ha sido director del Hahn-Meitner Institute para investigaciones nucleares, de Berlín, durante muchos años [130]; según el mismo, parte del dióxido de carbono producido por la oxidación del humus no se desprende en la atmósfera, sino que es inmediatamente disuelto en las aguas del subsuelo, con lo cual entra a formar parte del ciclo de los carbonatos; en consecuencia, la carga que la atmósfera tendría que soportar, en virtud de la destrucción del humus, que según los cálculos de WOODWELL y sus colegas se cifraría entre 0,5 y 5 mil millones de toneladas de carbono, por año (entre 1,8 y 18 mil millones de dióxido de carbono), podría resultar ser considerablemente menor (pág. 120). No obstante, un panel o grupo de trabajo sobre «Energía y clima», establecido por la Academia Nacional de Ciencias Americana, comprobó independientemente esta posible sima y llegó a la conclusión de que resulta muy poco probable que pueda tener alguna importancia real significativa [131].

Finalmente, aunque no por ello de menor importancia, otra nueva sugerencia fue presentada por WOODWELL, en un trabajo preparado para la reunión de la IIASA; en él expresa la posibilidad de que las bolitas fecales de los animales marinos, al caer en el seno de las aguas a velocidades bastante mayores que el plancton, podrían constituir el mecanismo que acelera considerablemente el *transporte de notables cantidades* de carbono, desde las aguas superficiales hacia las profundas y hasta el fondo del mar. «Los datos en apoyo de tal hipótesis son muy escasos —admite WOODWELL—, pero el esquema general parece razonable; el papel de la flora y fauna de

---

[129] E. T. ALEXANDERSSON, *Nature, 262,* 653, 1976; *Geology, 6,* 324, 1978.

[130] K. E. ZIMEN en: WILLIAMS (ed.), pág. 89.

[131] P. ABELSON y T. MALONE (eds.), *Energy and Climatte: Outer Limits to Growth?,* National Academy of Sciences of the USA, Washington, 1977.

una región (biota) en las transferencias oceánicas puede resultar más importante de lo que previamente se venía admitiendo» [132].

Por el momento, todas estas ideas son meras sugerencias que requieren ser contrastadas y cuantificadas; el problema de la sima que parece echarse de menos no ha sido, todavía, resuelto; no obstante, tras muchos años de intensas discusiones cabe esperar que habrá, por lo menos, alguna base común sobre la que puedan coincidir y encontrarse los biocientíficos y los expertos en ciencias de la Tierra.

Un intento encaminado a tratar de poner de acuerdo puntos de vista en conflicto fue presentado por ULRICH HAMPICKE (actualmente en la Universidad de Kassel) en la Conferencia que sobre «Interacciones de energía y clima» (véase Proceedings, W. BACH, J. PAKRATH y JILL WILLIAMS, eds., D. Reidel, Dordrocht y Boston, 1980, pág. 149) tuvo lugar en la Universidad de Münster (República Federal Alemana), en marzo de 1980; de acuerdo con HAMPICKE, los modelos de los geocientíficos, en relación a los intercambios de dióxido de carbono entre la atmósfera y océanos, podrían resultar correctos, o por lo menos casi correctos, a pesar del hecho de que, según su punto de vista, no puede existir ninguna duda acerca de que la destrucción de las selvas tropicales debe dar lugar a un considerable desprendimiento de dióxido de carbono. La solución consistiría en que deben existir simas biosféricas *terrestres* del dióxido de carbono, en regiones no tropicales; tales simas serían capaces de retener casi todo, o incluso la totalidad, del citado gas producido por la destrucción de las selvas tropicales. Las posibles simas podrían ser: una extensión del área forestal, en los países industrializados, a consecuencia del abandono de ciertas tierras dedicadas a la agricultura marginal; un nuevo recrecimiento e incremento de la biomasa en las selvas europeas que fueron destruidas con motivo de las dos guerras mundiales; un incremento en la cantidad del carbono reducido, almacenado en las ciénagas y pantanos boreales y muy especialmente en las enormes extensiones pantanosas del oeste de Siberia; un aumento del humus en las selvas boreales y en la tundra. De esta forma, en condiciones de equilibrio, la cantidad de dióxido de carbono que iría a parar a los océanos pudiera ser considerablemente inferior de la que admiten los biocientíficos que consideran como factor principal la destrucción de la

[132] G. M. WOODWELL en: WILLIAMS (ed.), págs. 65-6.

selva tropical, aunque, desde luego, sería aún algo superior a la que se supone en algunos modelos de los geofísicos.

3.6. PREDICCIONES CON MUCHAS INCOGNITAS

Las diferencias de opinión que tal como acabamos de ver existen entre biocientíficos y expertos en ciencias de la Tierra, acerca del ciclo del carbono, pueden ser la causa de un nuevo ímpetu adquirido por la investigación y, en general, muy útiles para el progreso de la ciencia. No obstante, para los que tratan de predecir el desarrollo de las concentraciones del dióxido de carbono atmosférico todas estas opiniones tan discrepantes hacen que su tarea resulte casi imposible. Si es verdad, como sugieren los biocientíficos, que durante los últimos cien años se desprendió mucha mayor cantidad de dióxido de carbono, debido a la destrucción forestal y de la capa de humus, del que ha sido absorbido por la vegetación, con lo que la biomasa total ha quedado reducida en tamaño, en lugar de aumentar, forzosamente ha de suceder que los cálculos a base de modelos realizados por los expertos en ciencias de la Tierra tienen que estar equivocados por *dos* razones; en primer lugar, porque basan sus cálculos, y por tanto su forma de distribución, en el erróneo supuesto de que la absorción neta del dióxido de carbono por la biosfera supera a la cantidad del mismo gas que la misma desprende; en segundo lugar, porque las cifras utilizadas en los cálculos, en relación a la cantidad de dióxido de carbono desprendido, principalmente en los procesos de la quema de combustibles fósiles, son demasiado pequeñas y no se toma en consideración el desprendimiento de dicho gas en los procesos de destrucción forestal y del manto de humus; existe una mayor cantidad de dióxido de carbono para la que hay que encontrar acomodo.

Las conclusiones obtenidas a partir de bases tan discutibles deben ser consideradas con mucho cuidado; no obstante, como los modelos incorporan dos errores que determinan desviaciones que tienen lugar en sentido opuesto, también puede ocurrir, hasta cierto punto, que tales errores queden mutuamente compensados; después de todo, dichos modelos fueron elaborados de forma que fueran capaces de «predecir» correctamente los incrementos en la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera, tal como efectivamente han sido observados hasta ahora. En consecuencia, resulta probable que los incrementos predichos por los modelos, para los

próximos veinte o treinta años, sean bastante correctos, pese a la posibilidad de que los cálculos contengan ciertos errores; naturalmente, cuanto más se extrapolen hacia el futuro los resultados tanto mayores pueden ser los efectos que tales errores han de ocasionar.

No obstante, no son tan sólo los métodos de cálculo los que resultan cuestionables, sino también algunos de los datos de entrada, puesto que las predicciones relativas al dióxido de carbono deben basarse en otras predicciones que, a su vez, son también discutibles: ¿cómo evolucionará a lo largo de las próximas décadas inmediatas, el consumo de combustibles fósiles?, ¿continuará acelerándose la destrucción forestal y del manto de humus, aún más, bajo la presión de una población en crecimiento?, ¿se producirá una repoblación forestal apreciable? Podríamos ir formulando pregunta tras pregunta y en todos los casos sólo cabría aventurar, más que una respuesta, una simple e intuitiva estimación. Tal vez la postura más «respetable» sería la de declarar que la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera irá en aumento, pero la magnitud y ritmo de tal incremento no pueden ser previstos, por el momento, con un cierto grado de seguridad.

Tal declaración, sin embargo, resultaría sumamente insatisfactoria, puesto que un incremento del dióxido de carbono por encima de un determinado valor umbral (cuyo valor es discutido), produciría con gran probabilidad graves alteraciones en el clima. En consecuencia, es *preciso* conocer de antemano qué es lo que puede ocurrir si se dan un cierto conjunto de circunstancias. El problema, a pesar del gran número de incógnitas que contiene, debe ser resuelto, por lo menos, hasta un punto que nos permita afirmar qué es lo que ocurriría a una de las incógnitas cuando se parte de ciertas hipótesis hechas acerca de las restantes.

En el Simposio de Brookhaven, en mayo de 1972, BACASTOW y KEELING presentaron su predicción acerca del incremento del dióxido de carbono en la atmósfera, para los próximos cien años, en base a un supuesto aumento en el consumo de combustibles fósiles al ritmo de crecimiento del 4 por 100; apenas había transcurrido año y medio, no obstante, cuando se puso de manifiesto que tales cifras no habían sido realistas, ya que, en virtud de la crisis del petróleo de 1973, el consumo de combustibles fósiles no experimentó ningún aumento en los años 1974 y 1975, y los economistas predijeron que los futuros ritmos de crecimiento iban a mantenerse por debajo de la tendencia existente con anterioridad a 1973. Un representante del Secretariado de la OCDE, de París, adujo tres razones justificativas de

la afirmación anterior: el enfrenamiento general del ritmo de crecimiento económico, el fuerte incentivo de la tendencia a conservar la energía, como resultado del aumento de los precios del petróleo y la creciente participación de la energía nuclear en la producción energética global [133].

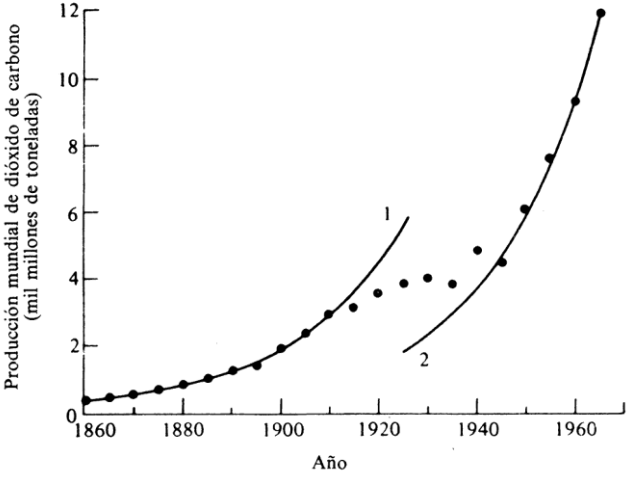


FIG. 11. Producción mundial de dióxido de carbono en virtud de la quema de combustibles fósiles; las curvas 1 y 2 corresponden a ajustes exponenciales con un ritmo de crecimiento anual del 4,3 y 4,8 por 100, respectivamente. (A partir de datos de KEELING; de D. R. KESTER y R. M. PYTKOWICZ, en W. STUMM (ed.), *Global Chemical Cycles and their alterations by Man*, Berlín, 1977, página 101.)

«Si observa el diagrama de KEELING para el futuro desarrollo y evolución del desprendimiento del dióxido de carbono en virtud de procesos industriales —me dijo C. E. JUNGE—, podrá comprobar que hay un período, entre 1910 y 1945, en el que existió un ritmo de crecimiento muy irregular y más lento. ¿Cómo podemos saber si no nos encontramos, hoy día, en otro análogo?»

Tal vez este punto de vista no resulte muy satisfactorio, pero a través de detallados cuestionarios propuestos, se pone de manifiesto que la mayor

[133] R. BACASTOW y C. D. KEELING en: WOODWELL y PECAN (eds.); R. E. HAMILTON en: STUMM (ed.), pág. 155.

parte de los economistas sólo están de acuerdo en que nada concreto podemos afirmar. Los diversos institutos económicos tienden a alterar sus previsiones de posibles tendencias, cada pocos meses, de modo que, en principio, todo es posible, con excepción del retorno al típico desarrollo, relativamente imperturbado, que se registró con anterioridad a 1973.

No obstante, existe otra forma de enfocar el problema; las previsiones a largo plazo, en relación al ritmo de crecimiento de la población mundial, dan una cifra de alrededor del 2 por 100 anual, de modo que cabe esperar que la producción de energía debería crecer a un ritmo algo más rápido, especialmente en los países en vías de desarrollo, en los que la población crece más rápidamente y la miseria es mucho mayor. Desde este punto de vista, la cifra del 4 por 100, para el ritmo de crecimiento del consumo mundial de energía, sugerida por BACASTOW y KEELING, como valor promedio a largo plazo, no parece resultar exagerada; bien es verdad que tal cifra no tiene en cuenta, desde luego, la cuestión de si existirá o no el suficiente suministro de combustibles fósiles para hacer frente a tal demanda.

«Resulta difícil imaginar un ritmo de crecimiento exponencial cuando se tienen en cuenta las reservas de combustibles fósiles existentes», afirma K. E. ZIMEN, experto en previsiones relativas al dióxido de carbono. Realmente, las previsiones presentes sugieren que las reservas de gas natural y petróleo quedarán virtualmente agotadas en las primeras décadas del próximo siglo. No obstante, las de carbón o esquistos petrolíferos son tan grandes que cabe admitir que podría mantenerse un ritmo de crecimiento progresivamente en aumento, hasta fines del próximo siglo xxi. Por otra parte, existen desarrollos tecnológicos en la actualidad que son capaces de permitir la extracción, a partir de aquellos materiales básicos, de otros combustibles líquidos y gaseosos sumamente eficaces.

Desde este punto de vista, el estudio de BACASTOW y KEELING probablemente no facilita una previsión muy realista, pero cabe utilizarlo para aquello que los futurólogos designan con el nombre de «guión», es decir, un estudio de lo que ocurriría si... De esta forma podría comprobarse cuáles serían las consecuencias si tratáramos de atender las necesidades energéticas de una población de diez o doce mil millones de personas, principalmente a base de combustibles fósiles, hasta mediados del próximo siglo. La predicción de BACASTOW y KEELING demuestra que tal cosa resulta simplemente imposible; con un aumento de tal tipo en el consumo de combustibles fósiles, durante los próximos cien años, la cantidad de dióxido de

carbono desprendido en la atmósfera llegaría a ser unas ocho veces superior a la que en la actualidad existe en la atmósfera; incluso en el caso de que, con todo optimismo, supusiéramos que tan sólo la mitad de tal cantidad iba a permanecer en la atmósfera, ello daría lugar a un incremento en la concentración del dióxido de carbono, hasta llegar a ser de tres a cuatro veces superior a los niveles que hoy se registran. Esto, con toda seguridad, determinaría unas consecuencias climáticas que serían realmente inaceptables. BACASTOW y KEELING son de la opinión que la situación podría ser todavía peor, en virtud de que pudiera darse el caso que los océanos fueran incapaces de mantener su ritmo de absorción, debido a las variaciones de su composición química; en consecuencia, predicen que la coincidencia de un cúmulo tal de circunstancias podría tener como resultado que la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera llegara a ser unas seis veces superior del nivel actual.

ZIMEN ha presentado unos cálculos [134] para el supuesto de una situación en la que el consumo de combustible fósil, en los próximos cien años, se estabilizara, caso que está en buen acuerdo con el punto de vista general de que la energía nuclear y tal vez también otras formas de obtención de energía, contribuyeran en forma creciente al volumen global de energía disponible; sin embargo, los resultados de tales predicciones, a pesar de que son más realistas que las de BACASTOW y KEELING, no resultan más optimistas. El contenido de dióxido de carbono en la atmósfera alcanzaría, allá por el año 2000, un nivel del 130 a 140 por 100, respecto al nivel de 1860 y, con un nuevo desarrollo de la utilización de combustibles, cabría esperar que se duplicara en el período de los próximos cincuenta a cien años. Únicamente en el caso de que el ritmo de crecimiento a largo plazo en el consumo de combustibles se redujera a un 1 o 1,5 por 100 anual, se mantendría el contenido de dióxido de carbono atmosférico por debajo de este nivel doble, en los próximos cien años. Según comenta el propio ZIMEN, «Podemos utilizar todas las reservas de combustible fósil existentes, con tal que no lo hagamos demasiado rápidamente».

---

[134] K. E. ZIMEN y F. K. ALTENHEIN, *Ztschr. f. Naturfschg., 28a,* 1747, 1973; K. E. ZIMEN y cols., *ibíd., 32a,* 1544 (1977).

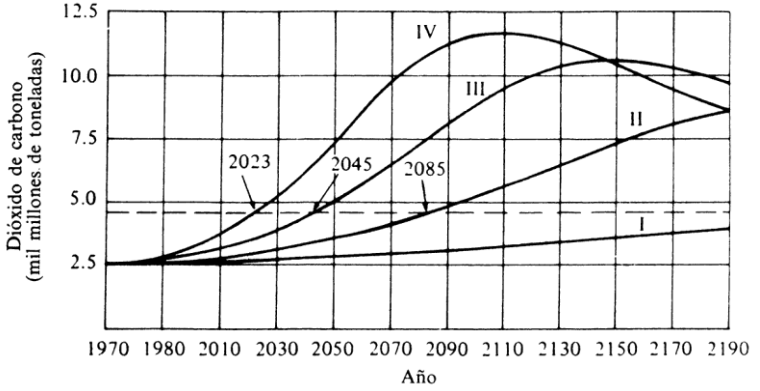


FIG. 12. Incremento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico calculado para un ritmo de crecimiento anual del 1 por 100 (I), del 2 por 100 (II), del 3 por 100 (III) y del 4 por 100 (IV), en el consumo de combustible fósil, y en el supuesto de que el ciclo biológico está equilibrado (es decir, no hay consumo ni producción netos de dióxido de carbono por la biosfera). Para ritmos de crecimiento superiores se obtienen mayores valores máximos de dióxido de carbono, pero las reservas de combustibles fósil se agotarían mucho antes, en comparación a lo que ocurre con menores ritmos de crecimiento. La línea de trazos corresponde a la duplicación del nivel que actualmente existe; las cifras corresponden al respectivo año en que tal nivel sería alcanzado. [De K. E. ZIMEN y cols., en: STUMM (ed.), página 296.]

ZIMEN y sus colaboradores calcularon las concentraciones del dióxido de carbono atmosférico para los tres supuestos de una biomasa mundial creciente, constante y decreciente, y, de acuerdo con su modelo, esto no tendría virtualmente ninguna influencia para las predicciones relativas al dióxido de carbono. En su opinión, la clave del problema reside en la forma en que el consumo de combustible vaya a ir desarrollándose; sin embargo, dichos investigadores sólo tuvieron en cuenta un ritmo de deforestación relativamente pequeño, con un desprendimiento de dióxido de carbono de tan sólo el 20 por 100 del que se origina por la utilización de los combustibles fósiles; una destrucción forestal al ritmo de la magnitud sugerida por WOODWELL y otros no puede acomodarse en el modelo de ZIMEN, conjuntamente con los datos de Mauna Loa, relativos a la pasada evolución de las concentraciones del dióxido de carbono en la atmósfera, salvo en el caso de que se introduzcan unos supuestos acerca de la capacidad de absorción de tal gas por los océanos que, a juicio de los expertos en oceanografía, carecen totalmente de realismo. Por otra parte, incluso para poder

introducir un ritmo de deforestación relativamente bajo, ZIMEN tuvo que suponer, para el resto de la vegetación, un «factor de crecimiento biota» muy alto, es decir, tuvo que admitir que el crecimiento vegetal viene reforzado considerablemente por cualquier incremento, por insignificante que sea, de la concentración del dióxido de carbono atmosférico, supuesto, este último, que es considerado como altamente improbable por todos los biocientíficos. Así pues, resulta que la descripción matemática de este problema pone de manifiesto, una vez más, que la elaboración de un modelo que fuera aceptable a la vez por los expertos en ciencias de la Tierra y biólogos es imposible, salvo en el caso en que se logre hallar una nueva sima adicional para el dióxido de carbono [135].

La cuestión de saber en qué forma podrían variar las predicciones relativas al dióxido de carbono, en caso de que fueran tenidas en cuenta las razones de los biólogos, también fue considerada por BERT BOLIN, quien en un trabajo presentado en la Conferencia de Dahlem y publicado poco después, afirma: «Los intentos de predecir el futuro crecimiento del contenido del dióxido de carbono en la atmósfera se han basado en el supuesto de que la fracción transportada por el aire de los productos producidos por las actividades humanas viene a ser del 50 por 100; si en lugar de tal cifra aceptamos la del 40 por 100 (o incluso menor), resulta que el futuro crecimiento de la citada concentración podría ser más lento y los posibles efectos secundarios, tales como los cambios climáticos, podrían retrasarse, con tal que se detuviera la destrucción de las zonas forestales del globo» [136].

En idéntica línea afirmó también en la reunión de trabajo de la IIASA: «Las consecuencias que las actividades humanas puedan tener en la futura evolución e incremento de las concentraciones del dióxido de carbono en la atmósfera pudieran ser algo menos espectaculares que las previstas por KEELING y BACASTOW. La razón principal que conduce a esta conclusión provisional es la de que los océanos y los sedimentos existentes en sus fondos pudieran ser simas más efectivas de lo que hasta ahora parecía posible.»

---

[135] Véase K. E. ZIMEN en: WILLIAMS (ed.), pág. 89.

[136] B. BOLIN, *Sciences, 196*, 613, 1977.

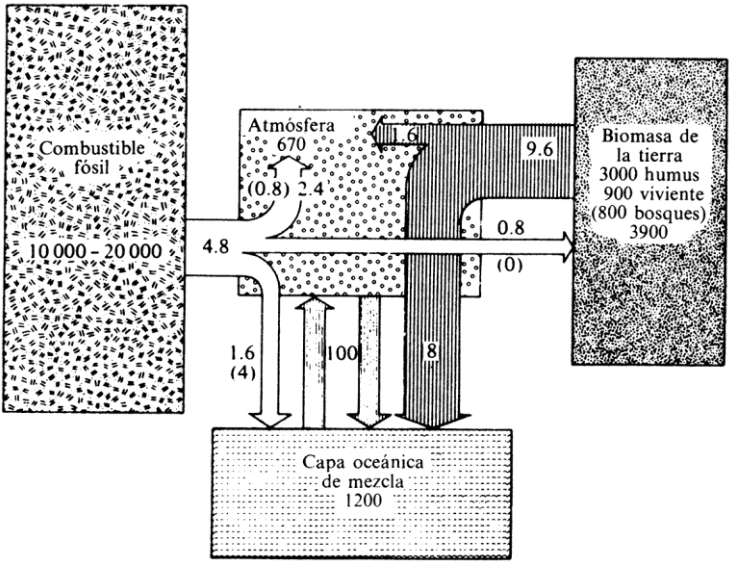


FIG. 13. Representación esquemática del ciclo global del dióxido de carbono modificado; el ciclo original del modelo de los geofísicos viene representado por flechas en blanco; las flechas sombreadas representan la hipótesis de flujo biogenético; el cambio subsiguiente del flujo del dióxido de carbono procedente de combustible fósil viene indicado entre paréntesis. [De A. NIR y cols., en STUMM (ed.).]

Sin embargo, BOLIN acompañó esta afirmación, ligeramente optimista, de unas palabras a modo de advertencia: «La quema continua de los combustibles fósiles, hasta que las reservas actualmente conocidas queden agotadas, conducirá a múltiples incrementos de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera, y esto ciertamente exige una seria consideración en relación a posibles cambios climáticos» [137].

En una previsión a largo plazo también resulta útil recordar que el depósito de reserva constituido por zonas forestales y manto de humus es considerablemente menor que el que forman los combustibles fósiles; si la destrucción de las selvas tropicales con lluvias resulta tan drástica como sugieren WOODWELL, ADAMS y BRÜNIG, tal proceso terminaría dentro de

[137] B. BOLIN en: WILLIAMS (ed.), pág. 41.

los próximos treinta años; esto significaría que ya no quedaría, virtualmente, ninguna de tales selvas tropicales que con posterioridad fuera susceptible de ser talada. Siempre que las selvas boreales de Siberia y Canadá no se vean sometidas al mismo tipo de destrucción irracional que observamos hoy día en los trópicos, resultará posible que la biomasa mundial no tan sólo no disminuya, sino que incluso pueda crecer.

Pero si, por una parte, las simas del dióxido de carbono (principalmente, los océanos) fueran capaces de absorber una cantidad considerablemente superior de la que hasta ahora se ha supuesto por parte de los expertos en ciencias de la Tierra y, por otra, una de las dos fuentes principales del citado gas en la atmósfera (destrucción forestal) quedara exhausta en treinta años, mientras que la otra, el combustible fósil, alcanzara tan sólo su valor máximo en el próximo siglo, podría resultar posible, incluso con un desprendimiento creciente procedente de la quema de combustibles fósiles, que el aumento experimentado por el dióxido de carbono en la atmósfera, a largo plazo, no fuera tan dramático como hasta ahora se ha venido prediciendo. Las circunstancias y condiciones para un consumo continuo, e incluso creciente, de los combustibles fósiles, pudieran ser, en consecuencia, considerablemente más favorable de lo que generalmente se supone en los modelos elaborados por los expertos en ciencias de la Tierra [138].

Esto resultaría cierto incluso en el caso de que los modelos de los expertos en ciencias de la Tierra sean virtualmente correctos, y la biosfera, en la actualidad, actuara a la vez *tanto de fuente como de sima.* (Tal pudiera ser el caso si el dióxido de carbono que se desprende por la destrucción de las selvas tropicales resultara parcial o totalmente compensado por un aumento de la biomasa y del humus que ocurriera en las zonas templadas.) Mientras la fuente constituida por las selvas tropicales quedaría agotada, en todo caso a principios del próximo siglo, las nuevas selvas en fase de crecimiento que existieran en otras partes pudieran actuar todavía como simas. Ningún biocientífico negará que la biosfera *podría* actuar como una sima grande y efectiva del dióxido de carbono, en caso de que se efectuara, a escala mundial, una extensa repoblación forestal. (En el capítulo 5 se insistirá sobre este tema.)

---

[138] Véase A. NIR y cois, (informe del grupo) en: STUMM (ed.), página 316.

En el caso de que el consumo de combustible fósil fuese a ir creciendo en el futuro al mismo ritmo en que lo vino haciendo durante la década de los años sesenta, todas las consideraciones en relación al papel de la biomasa resultarían, tan sólo, de una importancia marginal; la fuente determinada por el combustible fósil se haría pronto tan considerable que cualquier otra cosa que pudiera incorporarse a la biomasa carecería de importancia; por otra parte, si los ritmos de crecimiento en el consumo de combustibles fósiles, en los países industrializados, se mantuvieran tan bajos como en la actualidad parece probable, incluso en el caso de una mejoría global de las condiciones económicas mundiales, una reducción en la destrucción forestal y/o unos planes de repoblación a escala mundial pudieran determinar efectos considerables (véase también HAMPICKE, *óp. cit.*).

3.7. EL CLIMA, EN PELIGRO

El dióxido de carbono, como ya vimos, tiene la propiedad de ser un buen transmisor de la luz solar, pero en cambio exige una fuerte «tasa de aduana» a la radiación infrarroja que, procedente de la Tierra, se dirige hacia el espacio (pág. 41). Esto es lo que da lugar al denominado «efecto invernadero», que es lo que impide que se produzca un drástico enfriamiento nocturno de la Tierra. El aumento de la cantidad de dióxido de carbono existente en la atmósfera vendría a reforzar al citado efecto, y de ello se supone que resultaría un calentamiento de las capas de la atmósfera más próximas al suelo.

Hasta el momento, tal efecto *no* ha sido observado, aunque esto no debe tomarse como un argumento en favor del supuesto de que un incremento en la concentración del dióxido no daría lugar a efectos térmicos sobre la atmósfera, ya que lo que realmente pudiera suceder es que quedaran enmascaradas por otras fluctuaciones térmicas naturales mayores. Con objeto de determinar la tendencia de tales fluctuaciones, eliminando las variaciones «accidentales» a corto plazo, se ha recurrido a utilizar los valores medios a lo largo de cinco años (por ejemplo, tomando los años 1966-70, 1967-71, 1968-72, etc.). Este método de cálculo sugiere que la amplitud de la oscilación térmica, para el hemisferio norte considerado en conjunto, fue inferior a 1°C en los últimos cien años. En la región ártica se han observado oscilaciones mucho más importantes y del orden de los

2,5°C. Las tendencias indicadas por las dos curvas de la figura 13 son concordantes y nos muestran la existencia de temperaturas inferiores a la media durante el período 1880-1920, superiores en el período 1920-1960, con un nuevo enfriamiento durante la década de los años sesenta, seguido de un otro calentamiento posterior [139].

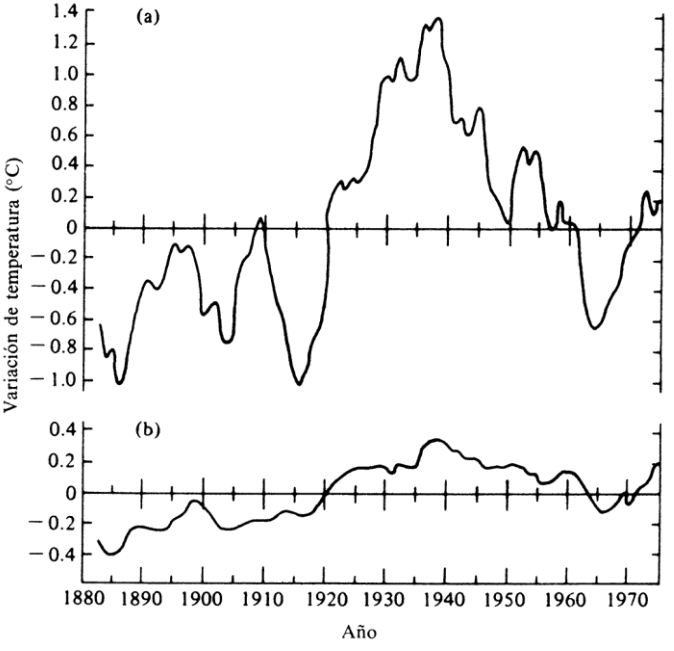


FIG. 14. Tendencia a largo plazo de las oscilaciones térmicas en el hemisferio norte (promedios de cinco años de medidas), *a)* Cinturón latitudinal 72,5°-87,5° N; *b)* Cinturón latitudinal 17,5° – 87,5°N. (De M. I. BUDYKO y K. Y. VINNIKOV, en STUMM [ed.].)

La causa de tales oscilaciones térmicas naturales no es todavía enteramente comprendida, pero debe de ser el resultado de una serie de interacciones entre diversas variables independientes: pequeñas variaciones de la intensidad de la radiación solar, ligeros cambios en la órbita terrestre e inclinación del eje de rotación de la Tierra, distintas cantidades de polvo

[139] M. I. BUDYKO y K. Y. VINNIKOW en: STUMM (ed.), pág. 189.

desprendidas en la estratosfera en virtud de erupciones volcánicas... todo ello ha podido determinar cambios en las características transmisoras de la atmósfera para la radiación solar.

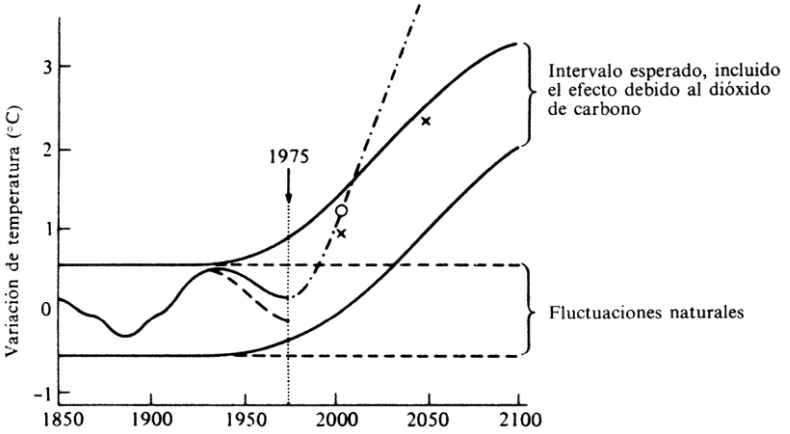


FIG. 15. Efectos sobre los cambios de temperaturas medias anuales globales según distintas fuentes de información; la línea de trazos nos muestra cómo hubiera evolucionado la temperatura global, probablemente, de no haberse producido el incremento del dióxido de carbono. (De H. FLÖHN, *Applied Science Development,* Inst. f. Scient. Cooperation, Tubinga, 1977, utilizando las siguientes fuentes de información: × = M. I. BUDYKO, *Izmenija Klimata,* Gridometeoizdát, Leningrado, 1974, página 260; -.-.-.-.-.- = W. W. KELLOGG, *Effects of Human Activities on Global Climate,* WMO Report, octubre, 1976, «Intervalo que es de esperar... » = J. M. MITCHELL, Jr., *Environmental Data Service Magazine,* marzo, 1977.)

Lo más probable es que no sean conocidos todos los factores capaces de influir el clima de la Tierra y mucho menos comprendida la forma en que todos ellos resultan amplificados o amortiguados por mutuos mecanismos de retroacción; en consecuencia, las previsiones que se realizan hoy día acerca de las futuras tendencias del clima no pueden estar exentas de un amplio margen de incertidumbre; en muchos casos no cabe más que confiar en una «intuición» o una simple hipótesis simplificada, más que una sólida base teórica.

La mayor parte de los expertos en climatología suponen que una duplicación de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera tendría como consecuencia que la temperatura media mundial experimentara un aumento entre los 2 y 3°C, aunque las temperaturas en el Ártico, y tal vez

también en el Antártico, pudieran aumentar de tres a cuatro veces más. Sin embargo, todas estas predicciones están basadas en modelos elaborados mediante ordenador [140], y tales modelos deben trabajar a base de notables supuestos simplificadores. Después de examinar estos modelos detalladamente, el físico R. S. KANDEL, de la Universidad de París, llega a la conclusión de que ciertos pequeños cambios, y no por cierto menos lógicos y plausibles, introducidos en los supuestos originales, podrían conducir a una alteración significativa de los resultados obtenidos en la previsión de cambios de temperatura, en el hipotético supuesto de una duplicación del contenido de dióxido de carbono, desde un valor insignificante de 0,5 a otro muy alarmante de 10°C [141]. De modo, pues, que la principal conclusión es que, por el momento, no cabe asegurar lo que cabría esperar, aunque bien *pudiera* ser que todo ello desembocara en un grave riesgo.

Para un profano, una variación global de 2 a 3°C en la temperatura media mundial puede parecer insignificante puesto que el intervalo de variaciones térmicas que se registran durante el año es bastante superior; sin embargo, no cabe utilizar las variaciones térmicas estacionales, como base de comparación de la importancia u otros efectos, frente a los promedios anuales; por ejemplo, un descenso del valor medio de tan sólo cinco grados ocasionaría la iniciación de una nueva era glacial, mientras que un aumento de dos o tres grados resultaría superior al calentamiento que afectó a Suiza, a últimos de la Edad Media, y que dio lugar, por diecisiete veces, a una plaga de langosta; tal aumento sería incluso ligeramente superior que el experimentado, hace algunos miles de años, cuando los vikingos navegaban por mares libres de hielos, y un país que hoy día es una isla cubierta de hielos gozaba de verdes playas; en aquellos tiempos, Groenlandia («tierra verde») mereció un nombre que hoy nos parece incongruente.

Por el momento, el dióxido de carbono atmosférico es el más importante, aunque desgraciadamente no el único, factor que, como consecuencia de las actividades humanas, determina un calentamiento general. El punto de vista que venía prevaleciendo, en el sentido de que la creciente

---

[140] Véase S. MANABE y R. T. WETHERALD, *J. Atmos. Sci., 32,* página 3, 1975; W. L. GATES, en BACH, PANKRATH, WILLIAMS, eds., op. cit., pág. 169.

[141] *Nature, 239,* pág. 634, 1981.

cantidad de polvo en el aire debería determinar un enfriamiento de la atmósfera, es rechazado, hoy día, por los meteorólogos [142]. Tan sólo el polvo que llega a penetrar en la estratosfera se considera actualmente capaz de producir tal efecto; el polvo contenido en el aire, cerca del suelo, no tan sólo reduce la cantidad de radiación solar capaz de llegar hasta el suelo, sino que también actúa, de la misma forma, frente a la que la Tierra emite de nuevo hacia el espacio; según cual sea el tamaño, color, composición química, etc., de las partículas de polvo, son absorbidas diversas partes del espectro de la radiación y con ello se calientan tales partículas, y éstas, a su vez, calientan al aire. En muchos casos, la cantidad de radiación que penetra a través de esta capa protectora del calor queda reducida en ambas direcciones y, en consecuencia, aunque existe menos radiación solar capaz de llegar hasta el suelo, subsiste todavía un efecto de calentamiento neto de la atmósfera inferior [143].

El creciente consumo de energía tiene también, como resultado, el que se produzca un calentamiento de nuestro ambiente, tal como es fácilmente comprobable hoy día en ciudades y conglomerados industriales. Tales zonas son realmente islas cálidas, en un mar más frío, puesto que su temperatura viene a ser unos pocos grados superior a la que existe en su entorno. No obstante, cuando esta cantidad de energía desprendida, como consecuencia de las actividades humanas, se considera a escala mundial, resulta realmente muy pequeña en comparación a la energía incidente procedente del Sol.

Finalmente, el creciente aumento de las concentraciones de diversos gases que en cuantía de simples vestigios, o trazas, se encuentran en la atmósfera, refuerza también este efecto de calentamiento a escala global; el constante aumento del consumo de combustibles aporta no tan sólo más cantidad de dióxido de carbono, sino que, a la vez, da lugar a un incremento de la cantidad de óxidos de nitrógeno, ya que una cierta parte del nitrógeno contenido en el aire resulta oxidado en los procesos de combustión. Por otra parte, el aumento experimentado por la utilización de fertilizantes determina que la concentración del gas hilarante (N_20) existente en la atmósfera vaya en aumento; análogamente, el uso de frascos rociadores,

---

[142] Por lo menos, como norma general y a largo plazo. *(N. del T.)*

[143] L. MACHTA en: W. N. HESS (ed.), *Weather and Climate Modification,* Wiley, Nueva York, 1974, pág. 700; H. FLOHN en: STUMM (ed.), pág. 211.

o *sprays*, ha dado lugar a una notable emisión de cloro- fluormetano (gas utilizado como portador-propelente en tales frascos). Las propiedades químicas específicas de este gas, así como sus efectos sobre el ozono atmosférico, serán discutidas con algún detalle en el capítulo 4 de este libro; por el momento bastará decir que desempeña, a su vez, un papel similar al del dióxido de carbono en el efecto invernado, debido a que también absorben energía en la zona infrarroja (es decir, reclaman unos particulares derechos arancelarios de aduana a la radiación que pasa a través de la atmósfera), y en zonas espectrales que no son fuertemente absorbidas por otros gases; a esta absorción, precisamente, se debe el calentamiento que experimenta la parte inferior de la atmósfera. Si se duplicara la cantidad de gas hilarante existente en la atmósfera, cosa que resulta ciertamente posible que ocurra en los próximos cincuenta años, ello traería, como consecuencia, un aumento de la temperatura media global de 0,5°C; el incremento de la cantidad de cloro-fluormetanos [144] podría, a su vez, determinar un aumento del orden de otro grado, en la citada temperatura [145]. Ambos aumentos vendrían a sumarse a los que, independientemente, se producirían debido al dióxido de carbono.

Las fluctuaciones térmicas, aunque de carácter general, son mucho más acusadas, tal como ya dijimos, en las regiones árticas que en latitudes medias o bajas, de modo que todos los factores que causan un calentamiento de la atmósfera determinan una disminución del gradiente térmico existente entre el ecuador y la región polar, lo que a su vez trae, como consecuencia, un debilitamiento de la circulación atmosférica en el hemisferio norte. En un trabajo presentado por el conocido climatólogo soviético M. I. BUDYKO, en la Conferencia de Dahlem, sugería que tales efectos, probablemente, conducirían a una notable disminución de la cantidad anual de precipitación por el interior de los continentes [146].

En ciertas zonas, especialmente en las proximidades del círculo polar, un calentamiento del orden de dos a tres grados podría considerarse como

---

[144] Comercialmente se suelen conocer bajo el nombre general de freones. *(N. del T.)*

[145] H. FLOHN en: WILLIAMS (ed.), pág. 227; V. RAMANATHAN, *Science, 190,* 150, 1975; W. D. WANG y cols., *Science, 194,* 685, 1976; *WMO,* 135, 6 de enero de 1976.

[146] BUDYKO y VINNAKOW.

un efecto positivo, pero en cambio una disminución de la cantidad de precipitación que tuviera lugar en regiones mucho mayores y más densamente pobladas, en latitudes medias y bajas, representaría un grave deterioro de sus condiciones generales normales. No obstante, incluso en el caso de que pueda representar un beneficio, al ser éste de cuantía y extensión imprevisibles con una cierta precisión, tal ventaja resultará siempre de muy dudoso carácter; téngase en cuenta que cada sociedad, tal como subrayó BUDYKO en su aportación a la Conferencia, se adapta a las condiciones climáticas dominantes y, en consecuencia, *cada* cambio, incluso en el caso de que represente una ventaja, exige un complicado proceso de adaptación a largo plazo, nuevas inversiones, etc.

Un calentamiento global de dos a tres grados, algo que cabría muy bien esperar como resultado de una duplicación de la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, conduciría a «unas inaceptables consecuencias climáticas», según declaró el climatólogo alemán HERMANN FLOHN, en la Conferencia de Dahlem. Tal cambio, sugiere, determinaría un corrimiento de unos 100 kilómetros hacia el norte del cinturón subtropical de altas presiones y esto produciría, posiblemente, una notable reducción de las precipitaciones invernales en California, países mediterráneos y del Oriente Medio, Pakistán y en el Asia Central que forma parte de la Unión Soviética, zonas en que las precipitaciones invernales resultan indispensables con vistas a mantener el abastecimiento de agua en todas ellas [147].

Otros científicos son un poco más cautos al tratar de hacer previsiones detalladas acerca de lo que podría suceder; el meteorólogo americano LESTER MACHTA afirmó durante el Simposio de Brookhaven que, como consecuencia del aumento de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera y el consiguiente proceso de calentamiento asociado, se iniciarían diversos mecanismos de retroalimentación, pero que sin llevar a cabo una gran labor de investigación adicional, se consideraba incapaz, por el momento, de elaborar cualquier predicción acerca de las posibles consecuencias climáticas [148].

---

[147] H. FLOHN en: STUMM (ed.), pág. 207; J. J. MORGAN y cois, (informe del grupo), ibíd., pág. 298.

[148] L. MACHTA en: WOODWELL y PECAN (eds.), pág. 21.

Un detallado estudio acerca de los mecanismos de retroacción en el sistema climático, capaces de afectar a los futuros niveles del dióxido de carbono, ha sido publicado recientemente

El profesor C. E. JUNGE comparte este mismo punto de vista: «Por el momento sabemos demasiado poco para que podamos ser capaces de hacer una previsión exacta acerca de cuál será el efecto producido por un incremento del dióxido de carbono —me confesó durante un descanso en la Conferencia de Dahlem—. No hemos llegado, todavía, a comprender estos mecanismos de retroalimentación, ni disponemos de ningún modelo realista de los mismos. Yo también creo que es muy probable que el dióxido de carbono tendrá un impacto notable sobre el clima, pero por el momento no puedo decirle qué efecto concreto podría producir un cierto incremento porcentual del contenido de tal gas en la atmósfera. Los efectos, en realidad, podrían muy bien ser mayores de lo que se considera probable, si bien, por otra parte, también pudiera darse el caso de que fueran inferiores.»

«¿Está usted de acuerdo con la sugestión hecha por el profesor FLOHN, en el sentido de que el aumento de la cantidad de dióxido de carbono que se espera tendrá 'consecuencias climáticas inaceptables'?», le pregunté.

«Estoy de acuerdo con el profesor FLOHN, de tal forma que yo diría que el dióxido de carbono va a representar un serio problema, en los próximos cien años, aunque por el momento no sea posible precisar la cuantía de tal gravedad.»

En la reunión de trabajo de la IIASA, de 1978, los climatólogos se mostraron incluso más reacios a hacer previsiones detalladas que en la Conferencia de Dahlem; en su discurso de introducción, el climatólogo americano WILLIAM W. KELLOGG afirmaba: «La temperatura representa, tan sólo, una medida del medio ambiente en que vivimos, pero es de esperar que las tendencias de las estructuras del viento y precipitaciones *regionales* serán de la misma, e incluso mayor, importancia para la agricultura, recursos hídricos, requisitos energéticos, etc. Nos complacería enormemente ser capaces de concretar cuáles serían los cambios que se producirían en la estructura de la circulación general, como resultado de un calentamiento global, y, sin embargo, nuestros modelos relativos a tal circulación son, todavía, demasiado burdos o primitivos para que podamos con-

---

por W. W. KELLOGG, *World Climatic Programme* (OMN; NU; ICSU); WCP-14; pág. 243, Ginebra, septiembre, 1981. *(N. del T.)*

siderarlos capaces de reproducirlos con cierto grado de confianza; particularmente, el ciclo hidrológico, que determina si va a caer nieve o lluvia, resulta muy difícil de ser incluido adecuadamente» [149].

Análogamente, en el informe del grupo de trabajo sobre climatología se afirma lo siguiente: «Algunos cambios regionales serán mucho más importantes que los valores medios globales, y podrán ser tanto positivos como negativos respecto a la temperatura y a las precipitaciones; el cambio climático traerá consigo tanto ganancias como pérdidas, beneficiados y perjudicados, aunque los climatólogos, por desgracia, ignoran cómo tendrá lugar el reparto» [150].

Mediante el estudio de las condiciones climáticas que prevalecieron, en el pasado, sobre la Tierra, se pueden encontrar ciertos indicios en relación a cómo podría ser afectado el clima, en determinadas regiones, como resultado de un calentamiento a escala global. Después de la última era glacial hubo un período, hace de cuatro a ocho mil años, en que la temperatura media global fue de uno a dos grados más alta que la de hoy; este período, por tanto, llevó asociado un mayor ritmo de evaporación y, en consecuencia, mayores precipitaciones si nos referimos a medias globales; muchas de las zonas que hoy son áridas (¡aunque no todas!) registraron entonces mayores cantidades de precipitación.

Cuando la situación existente en dicho período es descrita ante representantes de países en vías de desarrollo, especialmente del Cercano Oriente, unánimemente expresan sus deseos de volver a dicho pasado tan pronto como sea posible, según manifestó HERMANN FLOHN durante la reunión de trabajo de la IIASA. No obstante, afirmó a continuación, hace cinco mil años la península de Labrador quedaba todavía cubierta por glaciares, restos de la pasada era glacial, por lo que, en consecuencia, las estructuras de la circulación atmosférica de aquellos tiempos eran ciertamente muy distintas de las cabría esperar que existirían como resultado de un calentamiento global que se registrara en la actualidad. Según WILLIAM KELLOGG, las causas que en el mencionado pasado período determinaron el calentamiento estuvieron relacionadas, probablemente, con variaciones de la órbita terrestre alrededor del Sol y no fueron debidas a cambios en

---

[149] W. W. KELLOGG, separatas de la reunión de trabajo de la IIASA; véase también W. W. KELLOGG, *Bulletin of the Atomic Scientists* (en prensa).

[150] Véase WILLIAMS (ed.), informe del grupo de trabajo 11, página 307.

las características de la absorción de la atmósfera en el infrarrojo: «Aunque la Tierra pudo estar igualmente caliente, la forma en que la aportación del calor extra tuvo lugar debió de ser totalmente distinta; en consecuencia, no podemos tampoco suponer que las estructuras de la circulación fueran las mismas en ambos casos» [151].

A pesar de todo, cabe todavía pensar que los riesgos inherentes a la posible duplicación del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera pueden no resultar inaceptablemente grandes [152], tanto más si tenemos en cuenta que la solución alternativa, para evitar tal incremento, es recurrir a una creciente utilización de la energía nuclear que, a su vez, también trae consigo sus riesgos (esta cuestión será ampliada en el capítulo 5). Por esta razón, en un descanso de la reunión de la IIASA, le pregunté a HERMANN FLOHN: «LO que dijo usted hoy no me parece tan pesimista como lo que afirmaba en la Conferencia de Dahlem, ¿es que usted piensa ahora que resulta aceptable asumir el riesgo calculado e inherente a un calentamiento limitado global?».

«Lo que más me preocupa —fue su respuesta— es que ni la magnitud del calentamiento, ni el riesgo al mismo asociado, resultan ser conocidos con suficiente seguridad; si el calentamiento global, en virtud del aumento de la cantidad de dióxido de carbono y otros vestigios gaseosos, resultara ser de cuatro o cinco grados en lugar de dos o tres, esto vendría a significar un calentamiento de diez a quince grados en la zona ártica, y con ello la fusión de todo el hielo que a la deriva cubre el océano Ártico; esto representaría un cambio, que ciertamente tendría carácter *irreversible*, hacia una situación que no ha existido durante más de dos millones de años, sin que nadie pueda ser capaz de afirmar cuáles pudieran ser los efectos a escala local.»

De acuerdo con la evidencia de tipo geológico, siguió diciendo FLOHN, el océano Ártico se vio libre de hielos, por última vez, en los años finales de la edad terciaria, es decir, hace de doce a dos mil quinientos millones de años, tiempos en los que partes de Europa eran áridas estepas. A continuación, agregó: «Sin embargo, me gustaría aclarar que por mi parte

---

[151] KELLOGG.

[152] Véase U. HAMPICKE, *Umschau*, 77, 599, 1977.

pienso que sólo pueden producirse consecuencias climatológicas *inaceptables* en el caso de que se diera la situación mencionada, la de un océano Ártico libre de hielos, que podría estar determinada por un incremento en la concentración del dióxido de carbono hasta ser de dos y media a tres veces la actual. ¿Supongo que no es posible considerar como aceptable la presencia de lagos salados, como en el norte de África, en la proximidad de Viena?»

La razón que justifica toda esta preocupación, en relación al Ártico, es la existencia de una situación inestable en el mar polar que con cierta facilidad podría «invertirse»; la mayor parte del océano Ártico está cubierto por una capa de hielo cuyo espesor es de 2 a 3 metros y que, incluso en pleno verano, no llega a fundirse, si se exceptúan sus bordes próximos a las costas continentales; el hielo está formado a partir de agua fría de baja salinidad, que constantemente va siendo renovada mediante aguas procedentes de los grandes ríos siberianos y canadienses. Por debajo existe agua más cálida y de mayor salinidad, y por tanto más densa, aportada por la corriente del Golfo. Como el hielo tiene un alto poder reflector sobre la radiación solar, la región ártica, incluso en verano, resulta tan sólo ligeramente calentada; sin embargo, en caso de que el hielo se fundiera, la superficie superior se calentaría mucho más, al tiempo que se mezclaría con las aguas más cálidas procedentes del Atlántico. En caso de que tal situación llegara a presentarse probablemente ocurriría que el manto de hielo no podría renovarse, ni incluso en invierno [153]. La idea, que ha sido discutida durante muchos años en la Unión Soviética, acerca de la posibilidad de transportar algunas de las aguas del Obi y Yenissei hacia la zonas áridas del Asia Central, podría contribuir a la disminución, e incluso a la eliminación, del «manto» de aguas frías y, en consecuencia, a la fusión de la capa de hielo [154]. Las consecuencias que cabría esperar sería una mayor evaporación, más cantidad de nieve y cambios básicos en las estructuras de la circulación del hemisferio norte, aunque no resulte posible describir tales efectos detalladamente, ya que, como afirma WILLIAM KELLOGG [155],

---

[153] J. O. FLETCHER, *Bulletin of the Atomic Scientists,* diciembre, 1970, pág. 39.

[154] K. AAGAARD y L. K. COACHMAN, *Eos, 56,* 484, 1975.

[155] KELLOGG; véase también G. BREUER, *La modificación del tiempo,* Col. Exedra, Editorial Alhambra, Madrid, 1983.

«NO somos capaces tan siquiera de afirmar con cierto grado de certeza si el proceso de glaciación aumentaría o se debilitaría».

Preocupaciones, aunque de un tipo distinto, existen también en relación a la región polar austral, que está formada por un continente cubierto de hielo por una capa de algunos miles de metros de espesor; si tal gigantesca masa de hielo llegara a fundirse, el nivel de los mares se elevaría, por lo menos, en unos 80 metros; sin embargo, tal proceso tardaría en desarrollarse varios miles de años, y no es probable que ocurriera, a menos que se produjera un calentamiento global del orden de los 20 grados, de modo que no representa un riesgo inmediato. La mayor parte de tales hielos se encuentran sobre la parte llana oriental de la Antártida; sobre la vertiente occidental y montañosa de la misma, los glaciares se sitúan, por lo menos parcialmente, sobre acantilados situados por debajo del nivel del mar; algunos geólogos son de la opinión de que un calentamiento global de las aguas oceánicas podría dar lugar a que tales aguas actuaran a modo de «lubricante» en tales zonas, de modo que inducirían a que los glaciares «resbalaran» o se deslizaran hacia el mar (en un período de cien a doscientos años). Ello daría lugar a una elevación global del nivel de las aguas marinas, a escala mundial, en unos 6 metros, con el consiguiente aumento del área del océano Ártico cubierta por la corteza de hielo, y esto, a su vez, afectaría a las características reflectoras de la Tierra, con los consiguientes cambios climáticos, difícilmente previsibles [156].

[156] A. T. WILSON, *Nature, 201,* 147, 1964; T. HUGHES, *Journal of Geophysical Research, 78,* 7884, 1973.

CAPÍTULO 4

Nitrógeno y ozono: insospechadas relaciones mutuas

4.1. EL ORIGEN DE ORGANISMOS CAPACES DE AUTOSUBSISTENCIA A BASE DE NITROGENO

El nitrógeno está circulando constantemente a través de la materia viva; casi todos los átomos de nitrógeno que actualmente se encuentran en la atmósfera fueron repetidamente incorporados a organismos vivos por algún tiempo y luego desprendidos de los mismos. No obstante, aunque no hubiera existido jamás vida sobre la Tierra, nuestra atmósfera seguiría conteniendo, todavía, grandes cantidades de nitrógeno libre, incluso en el caso de que toda vida hubiera quedado destruida, dando lugar, con ello, a la desaparición del oxígeno atmosférico en el plazo de unos millones de años, en virtud de las reacciones químicas con la corteza terrestre, el nitrógeno libre seguiría subsistiendo en la atmósfera.

Existen algunas controversias acerca de si la atmósfera contenía ya cantidades apreciables de nitrógeno desde el comienzo de la historia de la Tierra, puesto que esto depende de cuán «reductora» fuera la primitiva atmósfera, es decir, de la cantidad de hidrógeno que contenía; por lo menos, una fracción del nitrógeno es probable que hubiera estado ligada al hidrógeno formando amoníaco (NH_3), y como éste es fácilmente soluble en agua, debió de ser un componente importante de la primitiva «sopa» (pág. 42). Las macromoléculas, tales como las proteínas y ácidos nucleicos que fueron indispensables para el origen de la vida, contienen nitrógeno pero también hidrógeno, carbono y oxígeno. Debido a las condiciones ambientales de carácter no oxidante que por aquel tiempo existían, este nitrógeno no estaba ligado al oxígeno, sino principalmente unido al hidrógeno y al carbono. Incluso en el supuesto de que la primitiva atmósfera no fuera de tipo reductor y se hubiera mantenido estrictamente neutra, se hubiera producido algo de amoníaco, .bajo los efectos catalizadores del óxido de titanio, que es un mineral bastante corriente en la corteza terrestre.

Tal como se discutió en el capítulo 2, los primeros organismos vivos probablemente se originaron por un azar, al ponerse en contacto dos blo-

ques estructurales susceptibles de acoplamiento; estos componentes capaces de acoplarse, sin embargo, existirían en el seno de la sopa primaria, pero seguramente tan sólo en cantidades limitadas. Para ser capaces de llegar a propagarse, los organismos primarios se verían obligados entonces a aprender a construir por sí mismos sus propias macromoléculas, a partir de componentes más sencillos, tales como los aminoácidos; desde luego, el término «aprender» lo utilizamos aquí en sentido metafórico. Aquellos organismos que, por el puro azar de una mutación favorable, consiguieron automantenerse, mediante ciertas reacciones elaborado- ras de sustancia orgánica, fueron ciertamente mejor dotados y afortunados que los otros que no pudieron lograrlo; fueron capaces de propagarse más rápidamente y de avanzar hacia medios ambientes en los que no existían macromoléculas completas; de esta forma, paso a paso, fueron desarrollándose organismos capaces de producir sus propios compuestos nitrogenados a partir de sustancias más y más sencillas, hasta que, finalmente, no fueron precisos los bloques o estructuras complejas, como los aminoácidos, sino que bastaron simplemente otros compuestos inorgánicos, como el amoníaco, que por aquellos tiempos seguían todavía prevaleciendo.

Pero, en forma gradual, también dichas sustancias fueron escaseando dentro de la primitiva sopa, ya que, por una parte, la propagación de los organismos vivos motivó una creciente demanda de compuestos de nitrógeno, mientras que, por otra, la transición desde una atmósfera re- ductora a otra de carácter neutro (pág. 44) determinó una disminución de la cantidad de amoníaco al tiempo que se producía un aumento del nitrógeno libre. Al principio, los organismos primitivos que se habían venido desarrollando en un ambiente que, por lo menos, era ligeramente reductor, eran incapaces de utilizar dicho nitrógeno libre, pero la búsqueda de amoníaco se fue haciendo más y más difícil al ir escaseando tal compuesto y, en consecuencia, resultó también «más costosa». En consecuencia, estuvo en juego la propia continuidad de la vida, a no ser que unas pocas especies fueran capaces de aprender la forma de producir tales compuestos esenciales a partir de otras sustancias básicas, más abundantes y asequibles, tales como el agua y el nitrógeno.

Como dice ENGELBERT BRODA, biofísico y químico nuclear de la Universidad de Viena que se venía dedicando al estudio e investigación del ciclo del nitrógeno: «Por aquel tiempo tuvo que surgir una situación en la que, para ciertos organismos primitivos, no debió de existir precio límite

para la adquisición de amoníaco», refiriéndose al hecho de que ciertas bacterias primitivas tuvieron que hacer derroche de grandes cantidades de energía, en forma de hasta veinticuatro moléculas de ATP (véase nota 92), para convertir una simple molécula de nitrógeno en amoníaco [157]. La síntesis del amoníaco (NH_3) a partir del nitrógeno y del hidrógeno es un proceso en el que, en teoría, se libera energía.

La fábrica de amoníaco de los microorganismos es un complejo sistema de enzimas que contienen hierro y molibdeno, denominado nitrogenasa; ni su estructura, ni la forma en que actúa han sido todavía completamente aclaradas [158].

En opinión de BRODA: «Desde luego el desarrollo de tan complicado y complejo dispositivo no se inició antes de que ello se hiciera realmente indispensable, es decir, antes de que el amoníaco comenzara a escasear; pero, por otra parte, como se trata de un sistema tan complicado, su evolución debió de requerir un largo período de tiempo que sospecho no fue inferior a una centena de millones de años; durante tal período, varios microorganismos tuvieron que sobrevivir, mientras que el sistema que se estaba desarrollando para producir amoníaco no resultaba muy eficiente, e incluso incapaz, con vistas a hacer frente al suministro del nitrógeno requerido; por tal razón debieron de verse obligados a recurrir de nuevo a complementar su amoníaco, a base de los residuos que existirían, todavía, en la sopa primitiva. De todo ello hay que deducir que la transición de una atmósfera reductora a otra neutra, y, por consiguiente, la correspondiente disminución del amoníaco en la atmósfera, debe de haber exigido mucho tiempo» [159].

No obstante, BRODA opina que la «fijación del nitrógeno», es decir, la capacidad de sintetizar el amoníaco, probablemente es anterior a la fotosíntesis. «Existen bacterias muy primitivas del género *Clostridia* que obtienen su energía, exclusivamente, por medio de la fermentación; pero mientras por lo que se refiere a la producción de energía son únicamente

---

[157] Véase E. BRODA, *Journal of Molecular Evolution*, 7, 87, 1975.

[158] Acerca de la nitrogenasa, véase R. C. BURNS y R. W. F. HARDY, *Nitrogen Fixation in Bacteria and Higher Plants*, Springer, Heidelberg, 1975, pág. 61; R. W. F. HARDY y U. D. HAVELKA, *Science, 188*, 633, 1975.

[159] Véase también E. BRODA, *Origins of Life, 8*, 87, 1977.

capaces de realizar procesos relativamente muy simples, en cuanto al consumo energético logran resolver el difícil problema de la fijación del nitrógeno, y ello es indudablemente debido a que desde las primeras fases de la evolución, tal proceso debió de representar para estos seres una cuestión de vida o muerte.»

En cualquier caso, la nitrogenasa debe de haberse desarrollado mucho antes de que fuera «inventada» la respiración; el complejo de las enzimas, por ser extremadamente sensible al oxígeno, probablemente se originó mucho antes de que existiera una atmósfera oxidante. Los organismos dotados de respiración, y que también son capaces de fijar al nitrógeno, están dotados de unos sistemas de salvaguarda incorporados que protegen a la nitrogenasa del oxígeno.

Cuando se desarrolló la fotosíntesis fueron surgiendo dos clases de organismos: unos que eran capaces de producir su propio combustible energético (es decir, hidratos de carbono) y otros que para ello precisaban valerse de la energía facilitada por los alimentos. La evolución del proceso de fijación del nitrógeno condujo también a una clasificación análoga; por un lado existen los organismos que pueden automantenerse por ser capaces de producir amoníaco a partir del nitrógeno libre, y por otro lado hay organismos que tan sólo son capaces de existir cuando en el ambiente hay amoníaco u otros compuestos de nitrógeno; muchas de estas últimas especies logran satisfacer sus necesidades de nitrógeno a base de juntarse simbióticamente con otros organismos que son capaces de fijar tal gas; otros subsisten gracias a compuestos nitrogenados producidos bien sea a través de procesos metabólicos o de desintegración, o de otros productos que se originan en procesos no biológicos, tales como las descargas eléctricas o la radiación ultravioleta.

4.2. ¿UN ANTEPASADO COMUN O TRANSFERENCIA GENETICA NATURAL?

Tanto la fijación del nitrógeno como la fotosíntesis resultan técnicas muy antiguas, puesto que fueron inventadas en tiempos en que los únicos organismos existentes eran los denominados procariotas (pág. 44); pero mientras la posibilidad de lograr vivir a base de la fotosíntesis fue, posteriormente, heredada también por las plantas verdes eucariotas, todos los

organismos conocidos capaces de fijar el nitrógeno son procariotas unicelulares primitivos. No podemos explicar por qué ocurre este hecho, pero resulta difícil pensar que se tratara de una simple casualidad.

Por lo general, se admite que los organismos que poseen en común un cierto sistema de enzimas y, en consecuencia, unas ciertas propiedades biológicas comunes, están estrechamente relacionados; éste no es indudablemente el caso cuando se trata de especies capaces de fijar nitrógeno, ya que, aparte del hecho de que todas ellas son procariotas, difícilmente tienen algo en común, pues pertenecen a distintas familias y clases de bacterias y cianofíceas; casi todas ellas tienen organismos estrechamente relacionados que son incapaces de fijar nitrógeno.

Resulta difícil imaginar que un complicado sistema de enzimas, tal como la nitrogenasa, haya podido desarrollarse independientemente para dar lugar a varias docenas distintas de clases de especies; esto resulta de lo más improbable, puesto que los sistemas enzimáticos de los diferentes organismos capaces de subsistir a base de la fijación de nitrógeno presentan muchas similitudes, a pesar de no ser completamente idénticas; lo que parece más probable es que surgiera una ramificación, en una fase posterior de la evolución, en lugar de haber tenido una evolución paralela e independiente al azar. Pero si todos los organismos vivos, capaces de subsistir a base de fijar nitrógeno, descienden de un antecesor común, inventor de dicha técnica, también todos sus «próximos parientes», que fueron incapaces de aplicarla, deben ser asimismo descendientes de dicho antecesor, y ¿cómo cabe explicar que tantos de sus descendientes directos hayan perdido tan útil y ventajosa habilidad?

A este interrogante E. BRODA responde: «Yo creo que éste pudiera ser muy bien el caso, puesto que la fijación de nitrógeno implica, pese a sus grandes ventajas, grandes dispendios; algunas bacterias consumen casi la mitad de sus disponibilidades energéticas en la producción de amoníaco, y la nitrogenasa viene a representar casi un 5 por 100 de su proteína celular, y esto representa, evidentemente, un porcentaje muy alto para una enzima que actúa tan sólo como catalizador.»

En sentido metafórico cabría decir que la puesta en marcha de una fábrica propia de amoníaco implica una fuerte inversión de capital y a la vez unos altos costes de funcionamiento, pero que una vez que existieron organismos capaces de producirlo también puede resultar ventajosa para otras especies incapaces de poseer tan costosas instalaciones y que pueden

emplear sus recursos energéticos .en otros menesteres para, en alguna forma, adquirir sus compuestos nitrogenados como productos elaborados por los que tienen tal capacidad de fijación.

Un bioquímico británico, J. R. POSTGATE, sugirió otra posible explicación; consiguió transferir la capacidad de fijación del nitrógeno de la bacteria *Klebsiella,* especie que se encuentra en el intestino humano, a la bacteria *Coli,* que vive en el mismo ambiente y que, en condiciones normales, es incapaz de tal fijación [160]; esto viene a ser, en principio, algo análogo al proceso por el cual la capacidad de resistencia frente a ciertas drogas se transfiere entre distintas especies de agentes patógenos. Basándose en sus experiencias, POSTGATE sospechó que pudieron haber ocurrido en la Naturaleza procesos análogos de transferencia de genes a través de «paquetes» de ácido nucleico (plásmidos) o virus. De la misma forma, pudo haber sido transferida, de un antecesor a diferentes especies no relacionadas entre sí, la capacidad de producir nitrogenasa.

BRODA, sin embargo, se muestra escéptico: «Las bacterias *Klebsiella* y *Coli* son parientes próximos, y, por tanto, una transferencia genética resulta considerablemente más fácil que entre organismos que no estén tan estrechamente relacionados en lo que se refiere a su pasado evolutivo; además, la nitrogenasa es un sistema grande y complejo; su producción no requiere únicamente un solo gen, sino una combinación de muchos de ellos, y yo no sé de ningún caso en la Naturaleza en el que tan gran paquete de genes fuera transferido entre 'parientes' solamente lejanos.»

Entre unos doscientos géneros de bacterias conocidos, clasificados en diez familias, por lo menos veinticinco géneros, de tres familias, comprenden ciertas especies capaces de fijar nitrógeno. Por lo general, y como regla, tan sólo unas pocas, y no todas, las especies de un género muestran tal capacidad; los científicos esperan descubrir entre otros quince géneros distintos, especies capaces de fijar nitrógeno, aunque en este terreno la investigación se encuentra en sus fases iniciales. Entre los ciento sesenta y cinco géneros de cianofíceas existentes se encontraron especies capaces de fijar nitrógeno en veintitrés géneros; pertenecen a dos de las tres familias de cianofíceas [161].

---

[160] R. A. DIXON y J. R. POSTGATE, *Nature, 237,* 102, 1972.

[161] BURNS y HARDY, pág. 18.

En las capas más profundas del suelo, donde existe un déficit de oxígeno, los más importantes fijadores de nitrógeno son los anaerobios antes mencionados, *Clostridia*, los que prosperan sobre toda la Tierra; en las capas superiores ventiladas, la fijación de nitrógeno se mantiene en gran parte por las bacterias capaces de respirar, *Azoto*, que es uno de los pocos géneros que consta exclusivamente de fijadores de nitrógeno. En condiciones climáticas extremas, como las que se registran en los desiertos o en las altas montañas y en las regiones polares, es principalmente la acción fijadora de las cianofíceas, ya sea por sí solas o como líquenes en simbiosis con hongos, lo que desempeña el papel pionero con vistas a hacer que tales áreas resulten aptas y habitables para la vegetación.

Las bacterias fijadoras de nitrógeno, algas o líquenes, por lo general, se forman sobre la superficie de plantas multicelulares, sobre sus hojas, tallos, así como por la zona de la corteza o raíces. Según WHITTAKER, el agua de lluvia que cae sobre la selva contiene mayor cantidad de nitrógeno disuelto a la altura de las cimas y copas de los árboles que cuando el agua se aleja, serpenteando, por entre la vegetación del suelo [162]. El nitrógeno es extraído por microorganismos, tomándolo del agua que se desliza hacia abajo sobre las plantas, y se supone que, finalmente, una parte del amoníaco producido por los fijadores de nitrógeno es, en alguna forma, incorporado a la propia planta; análogamente cabe admitir que las bacterias fijadoras de nitrógeno que pueblan el tracto digestivo de hombres y animales contribuyen también de alguna manera al suministro de nitrógeno (proteína) de los organismos en que se alojan [163].

Además de estas asociaciones, que son comparativamente débiles, hay también íntimas simbiosis notablemente organizadas, en las que los fijadores de nitrógeno proporcionan el deseado amoníaco a sus socios, mientras que éstos, a cambio, suministran nutrientes energéticos y otras ventajas. Con frecuencia, el asociado facilita un medio deficitario en oxígeno que evidentemente resulta muy conveniente con vistas a la máxima producción del amoníaco; en apariencia, tal ambiente es preferible incluso para aquellos fijadores de nitrógeno que, a la vez, poseen también la capacidad de respirar.

---

[162] R. H. WHITTAKER, *Communities and Ecosystems*, Nueva York, 1970, pág. 111.

[163] BURNS y HARDY, pág. 28.

La mejor conocida de tales simbiosis es la que ya fue citada anteriormente de los líquenes (cianofíceas y hongos) y la de las plantas leguminosas acompañadas de *Rhizobia* poblando sus raíces. Cuando se practica un tipo de cosecha rotativa, se utilizan con frecuencia guisantes, judías, tréboles, alfalfa, semilla de soja, cacahuetes y otras plantas leguminosas, debido a que parte de los compuestos de nitrógeno, producidos por la *Rhizobia*, quedan incorporados al suelo y lo enriquecen.

En los árboles del tipo aliso es bien conocido el hecho de que entran a formar parte de una simbiosis similar con otras especies de bacterias fijadoras de nitrógeno; el nitrógeno adicional es suministrado al suelo, ya que, frente a otros tipos de árboles de hojas no perennes que crecen en climas templados, el aliso produce un gran número de hojas, con un elevado contenido en nitrógeno. Para los cultivadores de arroz de la India, un helecho, viviendo en simbiosis con cianofíceas fijadoras, resulta muy importante; en Brasil, la simbiosis de ciertos tipos de maíz y de la caña de azúcar, con bacterias fijadoras de nitrógeno, fue descubierta por J. DÖBEREINER [164].

Muchos de los microorganismos fijadores de nitrógeno, así como muchos tipos de simbiosis entre plantas superiores y aquéllos, sólo fueron descubiertos muy recientemente, en los últimos años, de modo que es de esperar que se produzcan muchos más descubrimientos similares, pues evidentemente deben de existir bastantes más fijadores de nitrógeno, y mucho más nitrógeno fijado, de lo que generalmente, hasta hace poco tiempo, venía suponiéndose. A pesar de ello los compuestos de nitrógeno utilizables por las plantas superiores resultan más bien escasos en muchos ambientes.

Para la agricultura sería altamente deseable poder desarrollar especies cereales que fueran capaces de auto- abastecerse en relación al nitrógeno; existen grupos de investigación que tratan de producir nuevas especies de bacterias nitrogenantes que puedan ser capaces de entrar en simbiosis con cereales o nuevas especies de ellos y que consigan vivir en simbiosis con la *Rhizobia*. También hay en marcha experiencias en las que se trata de conseguir la transferencia directa de genes de nitrogenasa al cereal [165]. Un éxito que fuera conseguido en cualquiera de ambas líneas de investigación

---

[164] Véase J. F. W. v. BÜLOW y J. DÖBEREINER, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 12, 2389, 1975.

[165] HARDY y HAVELKA.

vendría a representar una importante contribución a la mejora de la situación global en cuanto a la alimentación se refiere.

4.3. EL CICLO DEL NITROGENO

Las proteínas, ácidos nucleicos y otras sustancias de importancia vital se producen a partir de complejos orgánicos (que contienen carbono) nitrogenados bastante menos complejos; en muchos ambientes tales compuestos son escasos, de modo que, en cuanto surgen, en virtud de procesos metabólicos o de desintegración, son afanosamente captados e incorporados por muchos organismos; por tanto, desde los tiempos iniciales ha existido un ciclo de los compuestos nitrogenados en los que éstos son inmediatamente utilizados por otros organismos, en lugar de sufrir la descomposición que los reduce a sus sustancias básicas.

Sin embargo, para la síntesis de macromoléculas se requiere energía; al principio, las descargas eléctricas atmosféricas y la radiación ultravioleta suministraban la que era necesaria para la formación de las sustancias disueltas en la sopa primitiva, pero más tarde los propios organismos produjeron la energía requerida para la producción de compuestos de nitrógeno superiores, a partir de unas pocas sustancias simples básicas; cuando tales compuestos sufren desintegración, dicha energía se desprende de nuevo, de modo que los compuestos nitrogenados actúan no sólo a modo de materiales estructurales de construcción, sino también como combustible, y siempre que en la Naturaleza surge la oportunidad de adquirir energía, por lo general, se desarrollan organismos capaces de utilizar tal posibilidad.

Es muy probable que ya desde antiguo, incluso antes de que existiesen los fijadores de nitrógeno, se desarrollaran microorganismos que obtenían su energía a partir de la descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados procedentes de otros organismos; mientras la atmósfera seguía siendo todavía reductora, el producto final de tales ciclos tan sólo podía ser el amoníaco (y no nitrógeno libre). A pesar del cambio sufrido por las condiciones ambientales, tales bacterias productoras de amoníaco sobrevivieron hasta nuestros tiempos, y el amoníaco que desprenden sirve de material estructural para otros organismos.

La utilización de los compuestos de nitrógeno como combustible no es tan sólo un privilegio de las bacterias especializadas en tal proceso; los

propios seres humanos, por ejemplo, somos capaces de descomponer el exceso de proteínas que incorporamos con los alimentos ingeridos y que no resulta necesario como material estructural; nuestro organismo gana energía mediante tal proceso, aunque en forma muy poco eficiente.

Con la transición hacia una atmósfera neutra y la evolución de los fijadores de nitrógeno, el nitrógeno libre también entró a incorporarse al ciclo biológico. Sin embargo, a lo largo de la era de las cianofíceas, de unos dos mil millones de años, evidentemente no existieron procesos biológicos por medio de los cuales los compuestos nitrogenados fueran descompuestos, para dar como producto final nitrógeno libre; no se conocen microorganismos capaces de transformar amoníaco en nitrógeno. A lo largo de tan extenso período, el ciclo solamente podía cerrarse por medio del amoníaco que, al ser desprendido en la atmósfera, era descompuesto por la radiación ultravioleta, de modo que durante la mencionada era no es probable que se pudiera establecer un estado de equilibrio ni para el nitrógeno ni el carbono; al parecer, se incorporaba a la biosfera mayor cantidad de nitrógeno captado por los organismos fijadores del que se desprendía procedente del amoníaco que escapaba. En consecuencia, la biomasa aumentaba, y con ello es probable que fuera incorporándose en los sedimentos una cantidad considerable de compuestos orgánicos nitrogenados.

Tan sólo cuando el oxígeno comenzó a acumularse en los océanos y en la atmósfera, surgió la posibilidad de que el propio amoníaco, producto previo final de las descomposiciones de los compuestos orgánicos nitrogenados, pudiera empezar a utilizarse como combustible, en una cadena de reacciones de oxidación. El nitrato (NO_3), el compuesto de nitrógeno más oxidado, es el producto final de una cadena metabólica que tiene lugar en los microorganismos denominados «nitrificantes» (*nitrosomas, nitrobacterias*); como nuestra atmósfera contiene oxígeno, también se forman óxidos de nitrógeno por medio de procesos inorgánicos, tales como las descargas eléctricas atmosféricas; luego, gracias a la precipitación, tales óxidos son transportados hasta el suelo y el agua, originándose, de esta forma, una fertilización natural de nitrógeno.

Bajo las condiciones ambientales que hoy prevalecen sobre la Tierra, el nitrógeno y el oxígeno libres no pueden constituir una mezcla estable; en principio, tal como decíamos en la introducción, es probable que reaccionen mutuamente entre sí hasta que todo el oxígeno quede agotado; tales

reacciones ocurren, en realidad, cuando son propiciadas por una cierta cantidad de energía, eléctrica o térmica. Sin embargo, los nitratos no pueden acumularse en los suelos o las aguas, ya que tan pronto como el oxígeno apareció en la atmósfera, la mayor parte de las plantas que necesitan compuestos nitrogenados, pero que son incapaces de aprovechar el nitrógeno libre, aprendieron la forma de utilizar los nitratos. A partir de éstos producen amoníaco, que es la sustancia básica para la elaboración de otros compuestos nitrogenados superiores, mediante procesos en los que se forma como subproducto dióxido de carbono.

Tan sólo en aquellas áreas en las que no hay plantas, como en lechos marinos o desiertos, es posible que vayan acumulándose los nitratos; no obstante, existen también microorganismos capaces de descomponerlos (pág. 59) mediante la respiración de nitratos (denominadas bacterias desnitrificantes); mientras exista disponible suficiente oxígeno, utilizan los compuestos orgánicos de carbono como combustible, obteniendo su energía por medio de la respiración; en un ambiente rico en nutrientes, pero deficiente en oxígeno, pueden obtenerlo a partir de los nitratos, con objeto de utilizarlos para la oxidación del carbono. Estos microorganismos reciclan el oxígeno ligado a los nitratos, reintegrándolo a la atmósfera en forma de dióxido de carbono. De esta forma, y por lo general, logran evitar la acumulación de nitratos, incluso en aquellas zonas en las que no existe vegetación.

Como la respiración por nitratos es más costosa que la respiración ordinaria, las bacterias desnitrificantes no usan más oxígeno de los nitratos del que es estrictamente necesario; mientras el contenido de oxígeno en la atmósfera sea superior al 5 por 100, se valen para subsistir de la respiración ordinaria, pero por debajo de tal nivel ponen en marcha el otro tipo de respiración por nitratos; para ello extraen sólo parcialmente el oxígeno del nitrato favoreciendo la producción de gas hilarante (N_2O) como producto final [166]; tan sólo en condiciones extremas, de una enorme escasez de oxígeno, recurren tales organismos a extraerlo totalmente del nitrato, en cuyo caso el producto final viene a ser el nitrógeno.

---

[166] J. HAHN y C. JUNGE, *Ztschr. f. Naturfschg., 32a,* 190, 1977, basándose en F. B. CADY y W. v. BATHOLOMEW, *Soil Sciences Society Proceedings, 25,* 477, 1961.

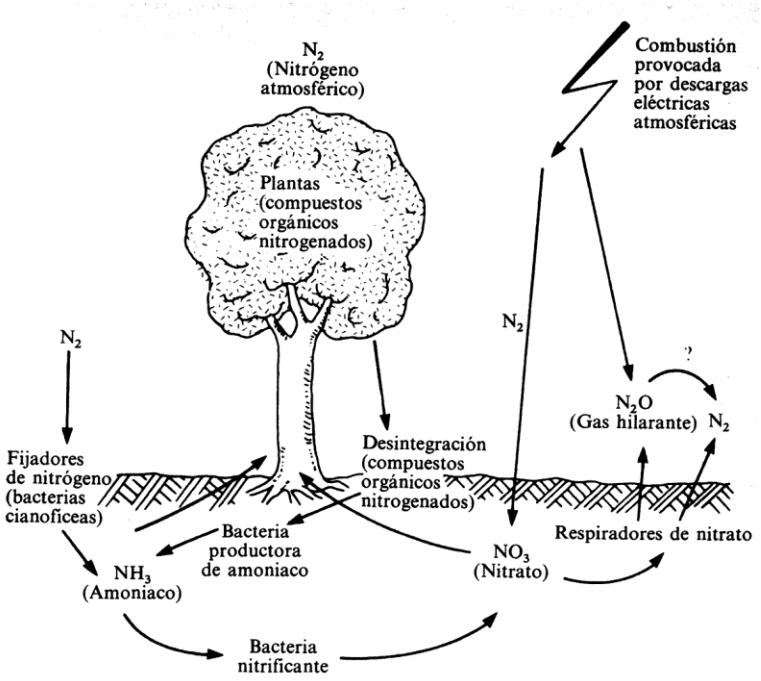


FIG. 16. Esquema simplificado del ciclo del nitrógeno. Una fracción del gas hilarante (N_2O) es descompuesto en la estratosfera; otra parte se supone que se convierte en nitrógeno en las capas atmosféricas próximas a la superficie terrestre o bajo la acción de microorganismos, de acuerdo con un mecanismo todavía desconocido.

Al originarse la respiración por nitratos, el ciclo biológico se cerró; al final de una larga cadena de reacciones, los compuestos orgánicos nitrogenados pudieron ser ya completamente descompuestos y, en consecuencia, el nitrógeno libre, que es la sustancia básica más simple, pudo ser reciclado y devuelto a la atmósfera. En general, se admite que tal ciclo está equilibrado bajo las condiciones naturales normales, es decir, no perturbadas por las actividades humanas, aunque tal extremo no ha sido todavía demostrado, ya que muchos detalles del ciclo del nitrógeno son insuficientemente conocidos, y los datos numéricos publicados por diversos científicos muestran aún una considerable dispersión, como se pone de manifiesto en la tabla.

TABLA 5
Velocidades de flujo del ciclo de nitrógeno
(Comparación entre las cifras dadas por diversos autores, en millones de toneladas por año)

	I	II	III
Fijación biológica	129	265	180
Fijación industrial	40	40	40
Compuestos de nitrógeno en la precipitación *	79	200	240
Desnitrificación total	160	315	349
N_2O procedente de la desnitrificación	?	70	60

I. C. C. DELWICHE, G. E. LIKENS y W. STUMM (ed.), *óp. cit.*, página 79.
II. J. HAHN, C. E. JUNGE, *óp. cit.*
III. M. B. MCELROY y col., *Rev. Geophyss. Space Physics.*, 14, 143, 1976.
* Producido por descargas eléctricas atmosféricas, combustión y otros procesos.

4.4. FERTILIZACION NITROGENANTE, INTENCIONADA O NO

En un ecosistema natural, por ejemplo, una selva primitiva, el balance del nitrógeno, normalmente, está equilibrado; la masa total de los compuestos de nitrógeno llevada hacia los ríos, por medio de las aguas superficiales y subterráneas, es pequeña. Por lo general, las pérdidas registradas por este lavado, así como las debidas a la respiración de bacterias por nitratos, pueden quedar compensadas por la acción de los organismos fijadores de nitrógeno y compuestos disueltos en las aguas de lluvia.

Cuando se abren claros en una selva, se intensifica extraordinariamente la masa de los compuestos de nitrógeno, así como la de otras sustancias de vital importancia, arrastradas hacia los ríos [167]. Esto, por sí mismo, determina un gradual empobrecimiento del suelo, pero las necesidades agrícolas exigen todavía más; tras la siega, los compuestos de nitrógeno, contenidos en las cosechas, quedan separados del ecosistema local. Cuando los productos agrícolas se utilizan como forraje, entonces, por lo menos en parte, tales compuestos son devueltos a los campos en forma de estiércol natural; sin embargo, por lo general, la mayor parte de las cosechas son transportadas a los mercados de las ciudades, e incluso exportadas, de modo que los productos humanos de desecho no van directamente a los

[167] WHITTAKER, pág. 120.

suelos, sino que, a través de las aguas residuales, pasan a los ríos y de éstos a los océanos. Desde el punto de vista de la higiene, esta forma de eliminar los productos residuales tiene, indudablemente, sus ventajas; en las regiones en las que existe un eficiente sistema de alcantarillado, las infecciones producidas por solitaria, triquinas, gusanos parásitos nematodos y otros parásitos patógenos, captados a través de las heces, llegaron prácticamente a desaparecer; en cambio, para los suelos esto representa una gran pérdida de nutrientes que en alguna forma tiene que ser compensada.

Durante miles de años, el hombre, sin tener plena consciencia del mecanismo, vino utilizando técnicas agrícolas para contrarrestar la depredación del suelo; además del abono natural, a base de estiércol, el barbecho para que el suelo se «recobre», la rotación de las cosechas con plantas leguminosas, etc., constituyen varios de los recursos utilizados. Esta recuperación refleja fundamentalmente el hecho de que la acumulación de los compuestos de nitrógeno, que se ha producido gracias a los microorganismos, puede propagarse por el suelo durante el período en que el terreno quedó en barbecho; análogamente, el cultivo de plantas leguminosas, capaces de vivir en simbiosis con las bacterias fijadoras de nitrógeno, conduce, incluso con mayor eficacia, al mismo resultado; la utilización de estiércol natural como fertilizante permite que casi todos los nutrientes puedan ser reciclados nuevamente hacia el suelo; el barbecho y la rotación de cosechas con plantas leguminosas únicamente logran incrementar el contenido de nitrógeno en los suelos, pero en cambio los restantes nutrientes esenciales (como fosfatos y potasio) no son repuestos, de modo que para poder obtener buen rendimiento en una cosecha de plantas leguminosas será preciso suministrar a los suelos las restantes sustancias de que carece [168].

Como se conoce bastante bien cuáles son las sustancias que los productos agrícolas toman, robándolas del suelo, resulta posible suministrárselas de nuevo, mediante fertilizantes industrialmente obtenidos y de esta forma se logran obtener incluso mejores resultados que los que se consiguen en buenas tierras naturales. Sin la masiva aplicación de fertilizantes, la situación alimentaria mundial sería incluso peor. Entre los partidarios de lo que se suele denominar «cultivo natural» se puso de moda rechazar

[168] C. C. DELWICHE, *Scientific American,* septiembre, 1970, página 111.

el uso de fertilizantes, pero en realidad *todo* tipo de agricultura resulta «artificial» y constituye una drástica interferencia con el sistema ecológico natural; viene a ser lo mismo que a una tierra de cultivo creada artificialmente se le suministre nitrógeno, procedente del cultivo de plantas leguminosas, o que se le apliquen fertilizantes de origen industrial, pues ambos casos no son más que meras facetas de un cierto grado de interferencia humana.

Para la mayor parte de los nutrientes, el flujo del ciclo geológico natural resulta acelerado y canalizado por la aplicación de fertilizantes; al suelo se le agregan mayores cantidades de sales de potasio o fosfatos de las que podrían suministrársele a través de los procesos naturales, tales como la acción de los elementos del tiempo, erosión o depósitos fluviales; es tan sólo con el nitrógeno como el hombre imita industrialmente un proceso biológico; el amoníaco se produce a partir del nitrógeno atmosférico (proceso Haber-Bosch), en la misma forma en que las propias condiciones locales, los fertilizantes nitrogenados se agregan a los suelos, ya sea como sales de amoníaco o en forma de nitratos, y cada una de ambas tiene sus ventajas e inconvenientes. Las sales de amonio son con relativa facilidad absorbidas por los componentes del suelo, por lo que les cuesta llegar hasta las plantas; en cambio, en el caso de los nitratos no existe tal dificultad, aunque también es verdad que al ser solubles en agua pueden ser eliminadas muy fácilmente por lavado; por otra parte, tienen que convertirse, por ellos mismos, en el amoníaco necesario, y esto implica el consumo de hidratos de carbono, lo que resulta a expensas y en perjuicio del rendimiento de la cosecha.

Además de esta fertilización intencionadamente realizada existe también otra que se lleva a cabo sin intención de hacerlo, por los óxidos de nitrógeno producidos a través de los procesos de combustión. Según dice JÜRGEN HAHN, que se ocupa de los problemas relacionados con el ciclo del nitrógeno en el Max-Planck Institut für Chemie, en Maguncia: «Tan sólo una pequeña fracción se origina a partir de la oxidación del nitrógeno contenido en el combustible; los óxidos de nitrógeno están primordialmente originados por oxidación del nitrógeno atmosférico que penetra en el motor de un coche, el sistema-hogar de calor de una estación de energía, de una planta industrial o de una vivienda, conjuntamente con el oxígeno necesario para la combustión.» Por medio de esta última pueden produ-

cirse dióxido de nitrógeno (NO_2) y óxido nítrico (NO), a partir de los cuales se forman ácidos fuertes con el agua de lluvia, con lo cual se acentúan los corrosivos efectos de la precipitación. La lluvia ácida, que es el terror de muchos países industrializados, se debe en parte a los óxidos de nitrógeno mencionados, aunque en mayor proporción se origina a partir del anhídrido sulfuroso que es desprendido en el seno de la atmósfera [169]. Tanto para el hombre como para los animales, los ácidos producidos a partir de los óxidos de nitrógeno resultan venenosos; en cambio, para los suelos constituyen una considerable cantidad adicional de fertilización nitrogenada.

Además de los óxidos de nitrógeno antes citados, en el proceso de combustión también se origina un gas menos oxidado, el gas hilarante (N_2O), que en las capas atmosféricas próximas al suelo es prácticamente inerte, «algo parecido a un gas noble», en opinión de J. HAHN, pero que si logra penetrar en la estratosfera, no obstante, contribuye a descomponer al ozono; por otra parte el mismo gas también colabora en la formación del efecto invernadero, antes mencionado (pág. 129) y por tanto contribuye asimismo al calentamiento de la Tierra. Un aumento en la abundancia de tal gas hilarante en la atmósfera podría constituir un serio riesgo para el medio ambiente, tal como discutiremos más adelante.

Cuanto más alta sea la temperatura a que tiene lugar el proceso de combustión, mayor será la cantidad de óxidos de nitrógeno que se formen; por otra parte, tales temperaturas altas implican, a su vez, una mayor eficiencia de la combustión y con ello una disminución de la carga de dióxido de carbono y otros productos originados en la combustión, en el ambiente, para una misma potencia producida; así pues, con vistas a la protección ambiental, hay que tener en cuenta dos efectos antagónicos, de los cuales tan sólo uno de ellos puede reducirse pero a expensas del otro; normalmente, y por razones de economía, se opta por temperaturas altas en la combustión, lo que significa tener que hacer frente a mayores cargas de óxidos de nitrógeno en la atmósfera.

En relación a las proporciones relativas entre la fijación de nitrógeno por vía natural y debidas a las actividades humanas, no se conocen todavía

---

[169] Véase C. C. DELWICHE y G. E. LIKENS en: W. STUMM (ed.), *Global Chemical Cycles and their Alterations by Man*, Berlín, 1977, página 78; véase también T. W. ASHENDEN y T. A. MANSFIELD, *Nature, 273*, 143, 1978.

datos exactos; en 1975, unos cuarenta millones de toneladas de nitrógeno eran fijadas a través de la producción de fertilizantes, pero se estima que para fines del presente siglo el ritmo anual de tal fijación superará con creces al centenar de millones de toneladas [170]. Actualmente, de veinte a cuarenta millones de toneladas de nitrógeno son, probablemente, oxidadas cada año, en los procesos de combustión, y estas cifras se espera que vayan aumentando también en el futuro. Además, la intensificación de los cultivos de plantas leguminosas está determinando un incremento de las cantidades de nitrógeno en la biosfera; en la Conferencia de Dahlem, C. DELWICHE nos dijo que, considerando todos estos procesos en conjunto, en la actualidad se está agregando mayor cantidad de nitrógeno a los suelos, por el propio hombre, del que pasa a los mismos a través de los ciclos naturales; otros científicos son de la opinión de que DELWICHE subestima el ritmo natural de la fijación del nitrógeno; de acuerdo con las estimaciones de los mismos, del orden de 200 a 300 millones de toneladas de nitrógeno son fijadas anualmente por microorganismos [171] (véase la tabla 5).

Pero incluso de acuerdo con las evaluaciones más conservadoras, el hombre, actualmente, está incrementando la cuantía en que tiene lugar la incorporación a los suelos en un 20 a un 30 por 100, y este ritmo es probable que resulte duplicado, por lo menos, hacia fines de siglo; esto debe tener un notable impacto sobre el ciclo natural, sin que resulte posible seguir pensando que los efectos debidos a la acción de las bacterias desnitrificantes podrán siempre contrarrestar el ritmo a que tiene lugar tal desarrollo; en tal caso hay que esperar que se produzca un aumento en la concentración de los nitratos en las aguas del subsuelo, como ya ha sido detectado en diferentes partes del mundo, y pueden alcanzarse concentraciones de tales compuestos, en las aguas potables, que resulten ser venenosas [172]; sin embargo, si realmente se intensificara la acción de las bacterias al

---

[170] Véase DELWICHE; HARDY y HAVELKA, que trabajan para el laboratorio de investigación y desarrollo de la corporación americana DuPont de Nemours, incluso consideran 200 millones de toneladas hasta el año 2000.

[171] Véase C. C. DELWICHE, *Ambio*, 6, 106, 1977, y en particular página 110; véase también BURNS y HARDY, pág. 43.

[172] Vase H. J. SIMPSON y cols. (informe del grupo), en: STUMM (ed.), pág. 253, y en particular página 264.

aumentar la respiración por nitratos se produciría un incremento de la concentración de gas hilarante en la atmósfera, con las consiguientes consecuencias para nuestro medio ambiente.

4.5. CASI UN GAS NOBLE

«El óxido nitroso (N_2O) —dice la Enciclopedia Británica— es un gas incoloro, con un agradable y dulce olor y sabor..., posee propiedades anestésicas que en algunos casos van precedidas de unos efectos peculiares que hacen que se les conozca con el nombre de gas hilarante.»

De acuerdo con las medidas más recientes, el aire que respiramos contiene unas 30 millonésimas del 1 por 100 (en volumen) de tal gas, lo que equivale en total a una masa de 1.500 millones de toneladas existentes en la atmósfera [173]. Actualmente, el contenido de tal gas ya es probable que sea superior al que existía en la atmósfera a principios de siglo; esto, sin embargo, no puede demostrarse debido a que antes de la Segunda Guerra Mundial no había instrumentos capaces de medir concentraciones tan bajas, e incluso las primeras medidas que se llevaron a cabo, allá por la década de los años cincuenta, no inspiran mucha confianza.

Tanto en los graneros como en invernaderos se registran niveles de óxido nitroso claramente más elevados, pero en ninguna parte las concentraciones medidas son susceptibles de determinar efectos apreciables sobre los seres humanos; aunque la Humanidad tuviera que afrontar un aumento del orden de diez o cien veces en la concentración del óxido nitroso en el aire, nadie se vería sometido a un ataque de risa, pero, en cambio, un simple aumento en un factor dos o tres respecto a la concentración actual, podría determinar una situación que en modo alguno podría tomarse en broma.

Según J. HAHN: «El óxido nitroso es vertido a la atmósfera procedente tanto de los continentes como de los océanos; el ritmo anual de producción no se conoce con exactitud, aunque las evaluaciones hechas suelen oscilar entre los 50 y los 500 millones de toneladas, con una cierta preferencia actual por los valores inferiores; su fuente más importante de producción

[173] Véase HAHN y JUNGE; J. HAHN en: W. BACH (ed.), *Maris Im- pact on Climate*, Berlín, 1978. De estos trabajos se tomaron otras cifras mencionadas en esta sección.

es la respiración por nitratos de los microorganismos. No obstante, suponemos que otros procesos biológicos, especialmente en virtud de la actividad de bacterias nitrogenantes, producen también óxido nitroso como subproducto, aunque esto no haya sido evaluado».

En base a experiencias de laboratorio, el americano E. C. ZIPF estima que la cantidad total de gas hilarante producido por descargas eléctricas atmosféricas llega a ser de 15 a 90 millones de toneladas anuales [174]; también se forman, gracias a los procesos de combustión, varios millones de toneladas de óxido nitroso, a los que se agregan asimismo pequeñas cantidades que las industrias químicas vierten al medio ambiente. Según comentario de HAHN, «Por lo que conozco, la producción de gas hilarante, en virtud de los trabajos para la eliminación de aguas residuales, no ha sido todavía investigada, aunque imagino que puede ser considerable».

Son diversos los factores que determinan el ritmo de producción del óxido nitroso en el suelo: la ventilación, que a su vez depende de la humedad del mismo, su composición química y su fertilidad, aunque también es cierto que incluso la tierra de los desiertos más notablemente estériles exuda pequeñas cantidades de dicho gas. Los más elevados ritmos de producción del mismo gas tienen lugar sobre las tierras de cultivo, tras haber recibido abonos nitrogenados.

Los compuestos de nitrógeno incorporado por las plantas son, asimismo, descompuestos en el curso del ciclo biológico, con lo que vienen a incorporarse a la cuantía correspondiente a la respiración por nitratos. Análogamente, no son tan sólo los fertilizantes los que resultan descompuestos por las diversas bacterias, sino también el estiércol y los compuestos nitrogenados, producidos por la *Rhizobia* en simbiosis con las plantas leguminosas. Como nos explica HAHN, «Puede afirmarse que básicamente *cada* aumento que experimenta la masa total de nitrógeno que circula por la biosfera ha de dar lugar, más pronto o más tarde, a un incremento del ritmo al que se desprende el óxido nitroso en la atmósfera [175].

Cuando visité a JÜRGEN HAHN, en Maguncia, en 1977, estaba precisamente calculando el aumento en la concentración del gas hilarante en la

---

[174] E. C. ZAPE, Reunión anual, *American Geophys. Union*, 1975.

[175] Véase C. JUNGE, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 98, 711, 1972; H. S. JOHNSTON y G. SELWYN, Geophysical Research Letters, 2, 549, 1975; P. J. CRUTZEN, Geophysical Research Letters, 3, 1969, 1976.

atmósfera que era de esperar se produciría hacia el fin del siglo xxi; partiendo él de que los datos de medida existentes, y que se había comprobado que eran probablemente incorrectos, supuso que del 3 al 18 por 100, según el tipo de fertilizante utilizado, del nitrógeno agregado a las tierras de cultivo, pudiera haberse transformado en gas hilarante [176]. Desde luego esto representaría la posibilidad de una situación francamente alarmante. Entretanto, fueron apareciendo otras técnicas de medición, nuevas y más exactas, y resultó que, dependiendo de las técnicas de cultivo y del tipo de fertilizante utilizado, la posible transformación real del nitrógeno fertilizante en gas hilarante, en la mayoría de los casos, es tan sólo del orden del 0,01 al 3 por 100, salvo cuando se utilice amoníaco anhidro, en que las cifras pueden ser del 4 al 7 por 100 [177]. Incluso en el supuesto de que se produjera dicho aumento mucho más moderado del gas hilarante, aún podría seguir teniendo alguna influencia sobre el «efecto invernadero» y otro, más ligero, sobre el ozono, como veremos más adelánte; pero el problema en la actualidad parece ser menos grave y urgente de lo que se supuso hace unos años. De cualquier forma, por el momento no parece que la cuestión del gas hilarante pueda representar un argumento para limitar la utilización de los fertilizantes nitrogenados, aunque bien pudiera suceder que llegara a serlo la creciente concentración de nitratos en aguas del subsuelo.

4.6. FRASCOS ATOMIZADORES (SPRAYS), FERTILIZANTES Y AVIACION SUPERSONICA

En la atmósfera tan sólo existen trazas de ozono, ya que la masa total de este gas existente en ella es inferior a los 3.300 millones de toneladas. Incluso en la estratosfera, donde se observan las concentraciones más altas de esta molécula triatómica de oxígeno, existe en una proporción de unas 5 milésimas del 1 por 100 respecto al volumen total. Tan sólo por esta razón ocurre que pequeñas cantidades de ciertas sustancias son capaces de determinar una considerable destrucción del ozono. Los frascos atomizadores o *sprays*, fertilizantes y aviones supersónicos tienen en común que

[176] Véase HAHN y JUNGE.

[177] W. SEILER, R. CONRAD, *APCA Journal*, *31*, pág. 767, 1981.

todos son capaces de producir sustancias contaminantes susceptibles de destruir el ozono.

Bajo condiciones normales existe, tal como discutíamos en el capítulo 2 de este libro, un equilibrio entre la formación y la destrucción del ozono (pág. 62); los óxidos de nitrógeno, átomos de oxígeno libres, productos de la descomposición fotolítica del vapor de agua, así como otros componentes de importancia menor, están implicados en los mecanismos de destrucción. Sus contribuciones relativas a la descomposición del ozono son de alrededor del 60, 20, 10 y 10 por 100, respectivamente, de acuerdo con los datos obtenidos por una comisión de la Academia Nacional de Ciencias Americana [178]. El gas hilarante es el único de los óxidos de nitrógeno que se produce en las capas inferiores de la atmósfera pero que luego resulta difundido y mezclado en la estratosfera; tanto el óxido nítrico como el dióxido de nitrógeno, tal como dijimos anteriormente, reaccionan con el vapor de agua para formar ácidos que son eliminados por el arrastre de las precipitaciones. El gas hilarante, que se comporta en la troposfera como un gas noble, reacciona en cambio en la estratosfera con los átomos de oxígeno «excitados», producidos bajo la acción de la radiación ultravioleta, formándose óxido nítrico, que reacciona con el ozono de acuerdo con la siguiente cadena de reacciones:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$
$$NO_2 + O \rightarrow NO + O_2$$

Como resultado neto de ambas reacciones, una molécula de ozono (O_3) y un átomo de oxígeno libre (O), se convierten en dos moléculas normales de oxígeno (O_2), mientras se recupera al final de la segunda reacción el óxido nítrico (NO) y queda dispuesto para iniciar el ciclo una y otra vez; en tal reacción en cadena, el óxido nítrico actúa de catalizador, es decir, que una molécula de óxido nítrico es capaz de descomponer muchas moléculas de ozono, hasta que se convierte en un compuesto químico que no reacciona con el ozono, como por ejemplo sucede a través de una reacción con los productos de la descomposición fotolítica del vapor de agua.

---

[178] Véase *Halocarbons-Environmental Effects of Chlorofluoromethane Release*, National Academy of Sciences of the USA, Washington, 1976, pág. 316.

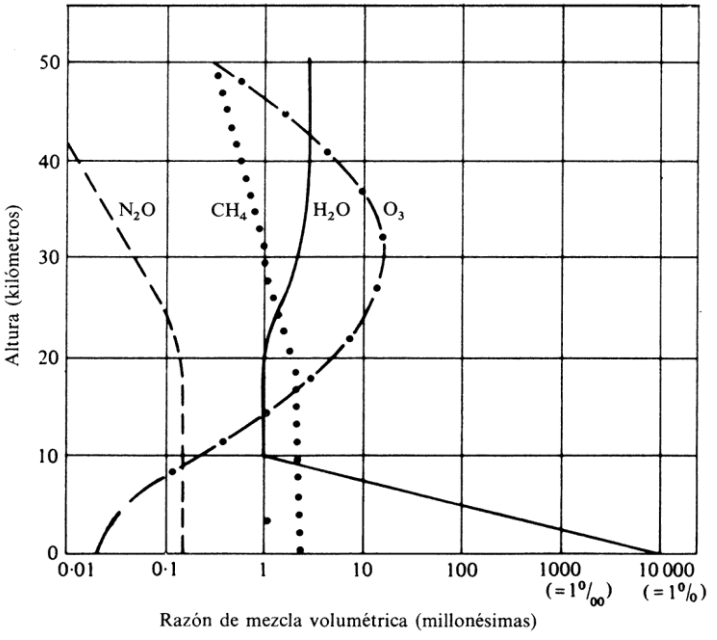


FIG. 17. Perfiles verticales de los gases que, como meros vestigios, existen en la atmósfera; el gas hilarante (N_2O) es descompuesto en la estratosfera mediante el proceso descrito en el texto, así como bajo la acción fotolítica de la radiación ultravioleta. El metano (CH_4) experimenta una descomposición similar, aunque algo más débil, en la estratosfera. El ozono (O_3) se forma en virtud de las reacciones discutidas en la página 36. En la troposfera el vapor de agua disminuye a medida que va aumentando la altitud, debido a la condensación y a la formación de cristales de hielo. En las latitudes medias, el límite superior para que pueda tener lugar la formación de nubes y precipitaciones es de 10 a 12 kilómetros, pero en los trópicos alcanza hasta unos 18 kilómetros de altura; por encima, en la estratosfera existen tan sólo vestigios de vapor de agua; en el curso de la descomposición del metano, en la estratosfera se produce algo de vapor de agua, tal como pone de relieve el ligero aumento que se indica en la figura por encima de los 20 kilómetros. (La distribución del vapor de agua no es todavía muy bien conocida, y los datos de que se dispone presentan una gran dispersión.)

Si la abundancia del gas hilarante en la atmósfera aumenta, en virtud del incremento experimentado por el uso de fertilizantes, grandes cantidades del citado gas consiguen llegar a la estratosfera, y esto parece muy probable que dé lugar a una creciente destrucción del ozono; sin embargo, resulta muy difícil valorar cuantitativamente estos efectos, dado que las

distintas sustancias capaces de descomponer al ozono también son susceptibles de reaccionar entre sí [179]. La sistemática investigación del complejo sistema de reacciones químicas que se desarrolla en la estratosfera se inició en los últimos años; nuevas interrelaciones van siendo descubiertas todavía, y la investigación en este terreno puede conducir a algunas sorpresas; tan sólo hace unos años se suponía que la duplicación de la concentración del óxido nitroso en la atmósfera iba a producir una destrucción del ozono que se estimaba alrededor del 20 por 100, mientras que actualmente se cree que el mismo efecto determinaría «tan sólo» una destrucción del ozono entre el 2 y el 6 por 100 [180].

Como ya mencionábamos anteriormente, el uso de los fertilizantes no es la única actividad humana que pueda representar una probable amenaza para la capa de ozono. Los aviones supersónicos descargan de golpe óxidos de nitrógeno y vapor de agua que se incorporan, directamente en la estratosfera, a las cadenas de reacciones químicas que allí ocurren; parece ser que mientras estén operando en la estratosfera tan sólo unos veinte o treinta aparatos tipo Concorde o Tupolev 144, y el gigantesco Boeing 2707 siga sin entrar en funcionamiento, el impacto ambiental de tales aviones probablemente resultará inapreciable; pero lo que podría suceder si entraran en operación diversos centenares de aviones supersónicos a niveles estratosféricos resulta ya ser otra cuestión a la que diversos modelos dan previsiones ampliamente discrepantes [181].

La tercera amenaza a la capa de ozono, y que hoy día se considera la más peligrosa, está constituida por ciertas sustancias a las que se denomina genéricamente «freones», y que son ampliamente utilizadas como propelentes en frascos atomizadores o *sprays.* (La preocupación se refiere principalmente a dos especies de freones; concretamente el triclorofluormetano, $CFCl_3$, y el diclorodimetano, CF_2Cl_2, que, de acuerdo con la nomenclatura comercial del principal productor, se denominan «freón-11» y «freón-12», respectivamente.) Estas sustancias fueron inicialmente desarrolladas, durante la década de los años treinta, como refrigerantes para las instalaciones de almacenaje en frío; se requerían sustancias que hirvieran

[179] Véase, por ejemplo, P. FABIAN, *Nature, 212,* 306, 1978.

[180] J. HAHN en: BACH (ed.).

[181] Véase N. VALERY, *New Scientist, 68,* 19, 1975; FABIAN.

entre los 0 y –40°C, que fueran estables químicamente, no inflamables ni venenosas, no demasiado caras y de fácil producción y almacenamiento. Gracias a un feliz azar se logró encontrar un grupo de sustancias que satisfacían todos estos requisitos [182].

Por aquel tiempo tales productos se producían para refrigeradoras y extintores de incendios, pero debido a sus propiedades resultaban evidentemente convenientes como propelentes en los frascos atomizadores o *sprays;* el primero de tales productos fue uno destinado al cabello, y se introdujo en el mercado en 1950, pero a partir de entonces la producción de frascos atomizadores fue creciendo rápidamente; en la actualidad, la mitad de la producción mundial de estas sustancias por año, que se estima alrededor del millón de toneladas, se destina a los *sprays.*

Como tanto el freón-11 como el freón-12 son químicamente estables, en la troposfera se comportan como los gases nobles; no son descompuestos por procesos químicos ni biológicos, por lo que, en consecuencia, se van acumulando gradualmente en la atmósfera; esto, por sí mismo, no debería ser motivo de preocupación, pero resulta importante en relación a otros dos efectos. Por una parte, tales compuestos, como antes se dijo, aumentan el «efecto invernadero» y con ello determinan un calentamiento de la atmósfera, además del que ya se produce por efecto del dióxido de carbono (pág. 140), y por otra parte resulta que son descompuestos bajo los efectos de la radiación ultravioleta en la estratosfera, con liberación de átomos de cloro; a lo largo de reacciones en cadena, análogas a las que ya han sido demostradas para el caso del óxido nítrico, el cloro reacciona con el ozono y átomos de oxígeno libre, sin que el cloro se consuma, de modo que, como si fuera un catalizador, puede determinar la descomposición del ozono, hasta que, finalmente, quede ligado a un compuesto inactivo, a través de una reacción con otras especies.

En un trabajo publicado por dos científicos americanos, M. J. MOLINA y F. S. ROWLAND, en 1974, se llamó, por vez primera, la atención sobre este problema ambiental [183], y es de imaginar que la reacción de la industria química frente a este punto de vista no fue, ni mucho menos, entusiasta, surgiendo inmediatamente eslóganes tales como «especulaciones»,

---

[182] M. SHERWOOD, *New Scientist, 68,* 15, 1975.

[183] M. J. MOLINA y F. S. ROWLAND, *Nature, 249,* 810, 1974; véase también ROWLAND, *New Scientist, 64,* 717, 1974.

«conclusiones prematuras», «exageraciones», «insuficiencia de datos experimentales», etc., y también objeciones frente a los intentos de prohibición de los *sprays* en tanto no existiera una definitiva evidencia de que realmente representaran un riesgo para el medio ambiente [184].

Entretanto, la comisión nombrada por la Academia Nacional de Ciencias Americana, antes citada, había analizado ya completamente el problema, concluyendo que la capa de ozono probablemente iba a reducirse de un 6 a un 7,5 por 100 en caso de que la utilización de los frascos *spray* prosiguiera a escala mundial y manteniéndose al nivel que había alcanzado en 1973 [185]. De acuerdo con las investigaciones más recientes acerca de las reacciones de acoplamiento en la química estratosférica, cabe esperar todavía una mayor destrucción del ozono, pues puede llegar a ser de un 10 por 100 [186]. Para tal constante ritmo de consumo de freones, el nuevo equilibrio para la concentración del ozono quedaría establecido dentro de los próximos cuarenta a cincuenta años, ya que se requiere un tiempo considerable antes que estos contaminantes puedan mezclarse e incorporarse a la estratosfera, partiendo de las capas inferiores de la atmósfera. Por la misma razón, aunque el uso de los freones fuera a cesar por completo, la destrucción del ozono proseguiría de todas formas aumentando, por lo menos durante otros diez años, y harían falta otros sesenta y cinco años para que la destrucción quedara reducida hasta un valor igual a la mitad del máximo alcanzado [187].

Más pesimistas todavía fueron las conclusiones a que se llegó en una reunión de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en junio de 1978, y en otra, patrocinada por la UNEP (Programa Ambiental de Naciones Unidas), que se celebró en Bonn, en noviembre del mismo año; ambas sugirieron que la destrucción del ozono puede llegar, finalmente, a ser del 15 por 100, en caso de que las emisiones de freones continúen al mismo

---

[184] En los Estados Unidos, en la década de los setenta, y bajo el eslogan de «Ban the Can» (prohibición de frascos *sprays),* se produjo una intensa campaña en contra de la correspondiente industria productora de freones (véase, por ejemplo, STEPHEN H. SCHNEIDER, *The Génesis Strategy,* Plenum Press, Nueva York-Londres, 1976, pág. 195). *(N. del T.)*

[185] *Halocarbons,* págs. 5-4.

[186] FABIAN.

[187] *Halocarbons,* págs. 5-19 y 5-13.

ritmo del año 1977 [188], mientras que el más reciente estudio, llevado a cabo por la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos [189], predice en tales circunstancias una destrucción del ozono del orden del 5 al 9 por 100. Además, existe en la actualidad una polémica acerca del ritmo al que en el presente año se produce la emisión de los clorofluormetanos; según la Asociación de Fabricantes de Productos Químicos Americana las emisiones de CF_2Cl_2 vienen disminuyendo desde 1974; SHERWOOD y colaboradores, por otra parte, pretenden que, de acuerdo con los datos obtenidos en sus medidas acerca de la concentración de tal gas en la atmósfera, fueron aumentando, por lo menos, hasta 1978 [190].

Cuando planteé esta cuestión a los participantes en la Conferencia de Dahlem, todos manifestaron su opinión en el sentido de que debería ser prohibida la utilización de los freones en los frascos atomizadores. «Tales *sprays* son realmente útiles, pero no son de la vital importancia, por ejemplo, que los fertilizantes», fue el comentario de JUNGE y, en su opinión, «Los argumentos en contra del uso de los freones poseen sólida base y resultan convincentes; incluso en el caso de que resultara que las cifras que se predicen acerca de la futura destrucción del ozono sean demasiado elevadas, cosa que por mi parte no considero probable, me sigue pareciendo todavía mucho mejor tomar tales precauciones en lugar de correr el riesgo de poner en peligro a la capa de ozono».

Las respuestas dadas por BOLIN y FLOHN fueron totalmente análogas, siguiendo la misma línea de razonamiento que en el caso anterior.

Entretanto, en los Estados Unidos quedó seriamente restringido el uso de los freones en los *sprays*, mientras que en Suecia fue completamente prohibido; los países del Mercado Común Europeo, y especialmente Francia y el Reino Unido, se muestran todavía reacios a seguir el mismo ejemplo [191].

---

[188] T. STOEL, *New Scientist, 81,* 166, 1979.

[189] *Causes and Effects of Stratospheric Ozone Reduction: An Update,* National Academy Press, Washington, 1982; véase también: T. H. MAUGH II, *Science, 216,* pág. 396, 1982.

[190] *Geophysics Res. Let.*, 9, pág. 239, 1982.

[191] *Ibíd.*; para una amplia revisión del tema de los frascos atomizadores véase L. Dono y H. SHIFF, *Ozone War,* Doubleday, Nueva York, 1978.

No parecen existir objeciones en relación a la utilización de freones en la refrigeración o en equipos de acondicionamiento del aire; lo único que habría que asegurar, en tales casos, y a ser posible mediante la legislación oportuna, es que las sustancias contenidas en los recipientes ya agotados fueran recogidas de modo que no pudieran verterse en la atmósfera.

4.7. CONSECUENCIAS DE LA DESTRUCCION DEL OZONO

Una ligera disminución del contenido de ozono en la atmósfera determinaría, fundamentalmente, un aumento de la intensidad de la radiación ultravioleta, de longitudes de onda comprendidas entre los 290 y 320 nanómetros (millonésimas de milímetro), que llega a la superficie terrestre; tal radiación, mientras su intensidad se mantiene entre ciertos límites, constituye parte de nuestro presente clima de radiación, siendo algo más intensa en las regiones montañosas que en las tierras bajas. En pequeñas dosis tal radiación produce quemaduras solares, pero las exposiciones prolongadas, durante años o décadas, son causa del cáncer de piel. Si la destrucción del ozono fuera aún más importante, tal radiación tendría todavía efectos más graves, pues se podría dar la circunstancia de que incluso las radiaciones de longitud de onda inferior a los 290 nanómetros, que actualmente resultan completamente absorbidas en la ozonosfera, conseguirían llegar hasta nosotros en la superficie terrestre [192]; esta última radiación es capaz de descomponer ácidos nucleicos y proteínas.

De acuerdo con un informe de la Academia Nacional de Ciencias Americana, a cada 1 por 100 de empobrecimiento que experimente la capa de ozono es probable que corresponde un aumento de alrededor un 2 por 100 en la incidencia del cáncer de piel; de modo que para una reducción del ozono del orden del 5 por 100 se producirían unos 40.000 casos adicionales de tal enfermedad cada año, y esto tan sólo en los Estados Unidos [193]. En la mayoría de los casos, el cáncer de piel puede ser satisfactoriamente sometido a terapéutica; tan sólo un tipo especial, conocido por el nombre de melanoma (crecimiento exuberante de las células pigmentarias oscuras)

---

[192] Véase A. C. GIESE, *Living with our Sun's Ultraviolet Rays,* Plenum Press, Nueva York, 1976, pág. 173.

[193] Cita tomada de ROWLAND, 1974, y *New Scientist,* 68, 8, 1975.

resulta, por lo general, de fatales consecuencias. En la actualidad se registran anualmente en los Estados Unidos, unos cinco mil casos de muerte debidos al cáncer de piel; en consecuencia, una destrucción del orden del 5 por 100 de la capa de ozono, y, por tanto, un incremento del 10 por 100 en la incidencia de tal enfermedad representaría, tan sólo para los Estados Unidos, unos 500 casos adicionales, por año, de muertes debidas a dicha causa.

No resulta posible extrapolar tales estimaciones a toda la población del globo mediante una simple multiplicación, ya que los individuos de raza blanca, aparte de ser más susceptibles a las quemaduras por la acción del Sol, lo son también al cáncer de piel en mayor proporción que las restantes razas de color; sin embargo, no hay duda que para cualquier parte de la Tierra cabe esperar que se producirían efectos apreciables, estadísticamente verificables.

El informe de la Academia Americana de Ciencias [194] es todavía más pesimista; hoy día se supone que por cada 1 por 100 de disminución del ozono se registraría un incremento del 2 al 5 por 100 en la incidencia del cáncer de piel y de un 4 a un 10 por 100 de casos de cáncer de piel más serios, por afectar a la membrana ósea del temporal; también se producirían incrementos en los casos de melanomas, aunque en el estado actual de nuestros conocimientos no cabe hacer un pronóstico cuantitativo.

Por otra parte, las recientes investigaciones llevadas a cabo tanto en seres humanos como en animales han demostrado que la radiación ultravioleta, incluso en su forma menos dañina, como la de quemaduras producidas por el Sol, afecta la viabilidad y la función de la circulación de linfocitos, así como al sistema de inmunidad.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que todas las cifras que se han citado se aplicarían tan sólo en el supuesto de que *no fueran tomadas las debidas precauciones,* cuando en realidad resulta relativamente sencillo protegerse contra el impacto de la radiación ultravioleta. En caso de que la dosis de radiación aumentara ligeramente, bastaría una continua aplicación de aceite o cremas sobre el cuerpo, protegerse mediante un sombrero de paja los días soleados y tratar de no exponer la piel desnuda al sol; precisamente este tipo de protecciones son las mismas que tienen muy en cuenta

[194] *Óp. cit.* Véase también MAUGH, 11, *óp. cit.*

las personas con experiencia en las regiones de alta montaña, donde la radiación ultravioleta es más intensa; no obstante, no resulta claro si tales medidas de precaución bastarían en el supuesto de que se comprobara un notable aumento en la dosis de radiación recibida.

Probablemente, el riesgo *inmediato* más grave para el hombre es su natural tendencia a subestimar tales peligros, pues la destrucción del ozono, con la consiguiente intensificación de la dosis de radiación ultravioleta, proseguirá lentamente, y su incidencia sobre el cáncer de piel con frecuencia sólo se pone de manifiesto tras algunas décadas. ¿Será capaz la gente de no olvidar la necesidad de someterse a sí misma, y a sus hijos, a la protección del aceite varias veces al día? ¿Estarán las gentes dispuestas a prescindir de los intensos baños solares, cuando, en opinión de muchos médicos, no resultan peligrosos, incluso bajo las condiciones presentes de la radiación? Evidentemente, en tal sentido queda por hacer una gran tarea educativa. Desde luego, la radiación ultravioleta intensificada no representa exclusivamente un peligro para el hombre, sino también para otros organismos. En la bibliografía científica que se ocupa del problema del ozono con frecuencia se plantea la cuestión de cuál podría ser el impacto que tal intensificación produciría en las cosechas, en los insectos responsables de la polinización, o sobre el plancton y los microbios, pero, por el momento, nadie es capaz de dar una respuesta [195].

Los resultados de las importantes experiencias que hasta hoy se llevaron a cabo se prestan a controversia, según informó HARVEY BROOKS en la Conferencia de Dahlem; este físico americano, que se interesa particularmente por el estudio de las relaciones entre ciencia y sociedad, es de la opinión que han de transcurrir varias décadas antes de que sea posible llegar a establecer criterios que con cierta verosimilitud permitan valorar tales efectos [196].

En opinión de E. BRODA: «NO creo que debamos exagerar la importancia de estas amenazas potenciales; si el número de enfermedades mortales debidas al cáncer llegara a duplicarse, esto representaría, a escala mundial, que fallecerían unas diez mil personas más cada año, lo cual realmente es un serio problema; no obstante, si el ritmo de enfermedades mortales en el

[195] ROWLAND, 1975; véase también GIESE, pág. 175.

[196] H. BROOKS, en: STUMM (ed.), pág. 246.

ganado se duplicara, pasando desde el 1 al 2 por 100.000, por ejemplo, que son cifras cuyo orden de magnitud, probablemente, resulta adecuado, sucedería que ni incluso los ganaderos tendrían que sentirse preocupados por tales pérdidas adicionales; si, por otra parte, resultara que no existen especies importantes, de animales o plantas, que sean por lo menos cien veces más susceptibles al impacto de la radiación ultravioleta que la propia raza humana, tampoco *este* problema tendría la menor importancia.»

«¿Y qué me dice usted acerca de las algas, las bacterias y otros microorganismos? —pregunté—. Pues hay que tener en cuenta que, sin lugar a dudas, tales organismos son notablemente más susceptibles a la radiación que los multicelulares.»

«Desde luego, pero tan sólo en el caso de que estén expuestos directamente a la radiación; las bacterias de los suelos, por ejemplo, se encuentran bien protegidas; en las aguas, únicamente el plancton que está poblando las capas más superiores, de unos centímetros de espesor, resultaría afectado; los que correrían mayor peligro serían los microbios existentes en la atmósfera o que habitan en la superficie de las plantas, hasta el extremo de que muchos perecerían, aunque no soy capaz de imaginar que tales especies llegaran a desaparecer por tal motivo; siempre subsistiría un cierto número de supervivientes individuales, y los microbios se multiplican a un ritmo extraordinariamente rápido, de modo que bastarían unos pocos días de mal tiempo, y, por tanto, con menor intensidad de radiación, para que se restableciera la población.»

A pesar de todo, hizo notar BRODA, no debemos olvidarnos y echar a un lado el problema, simplemente en virtud de unas pocas ideas y razonamientos más o menos improvisados; es preciso comprobar cuidadosamente si existen ciertos componentes en nuestro sistema ecológico que puedan ser, tal vez, capaces de ofrecer mayor vulnerabilidad frente a la radiación ultravioleta, aunque desde nuestro punto de vista podamos considerarlo bastante poco probable.

Además de los efectos biológicos, una disminución del contenido de ozono en la atmósfera también es probable que produjera variaciones en la distribución de temperaturas en la estratosfera, y esto, con toda probabilidad, tendría consecuencias tanto para el tiempo atmosférico como para el clima. Por el momento, no obstante, existe todavía bastante desacuerdo

entre los propios meteorólogos acerca de la naturaleza y magnitud de los cambios que podrían acaecer [197].

[197] Véase ROWLAND, 1975, en relación a un estudio de la American Academy of Sciences.

CAPÍTULO 5

Un difícil dilema

5.1. SI LOS MICROORGANISMOS FUERAN SERES HUMANOS...

Si los microorganismos fueran seres humanos, capaces de comprender las consecuencias de sus actividades, es probable que se hubieran preocupado de las posibles consecuencias y efectos secundarios de la fotosíntesis; en tal caso, cuando la nueva técnica recientemente inventada entrara en vigor, hace unos cuatro mil millones de años, tal vez se hubiera organizado una reunión para discutir públicamente estos problemas ambientales.

En tal reunión los representantes de los ecologistas conservadores, seres anaerobios, seguramente hubieran puesto de manifiesto su evidente y profunda preocupación acerca de una posible distorsión que tal vez iba a producirse en virtud de la introducción de esta nueva técnica; no se trataba de que ellos estuvieran en contra de una limitada aplicación de la fotosíntesis, hubieran dicho, seguramente, con tal de que los materiales básicos utilizados, tales como el sulfuro de hidrógeno, no vinieran a contaminar el ambiente; sin embargo, una expansión de tal tecnología que fuera capaz de producir, en forma continua, notables cantidades de un gas tan claramente venenoso como el oxígeno, en forma de producto de desecho, debería ser rechazada con firmeza, ya que, de lo contrario, los productos residuales de la fotosíntesis, finalmente, podrían ser capaces de llegar a contaminar de modo global todo el medio ambiente.

Los representantes del partido progresista-liberal, las cianofíceas, pudieron haber replicado que, en vista de los ritmos de crecimiento previstos, las futuras exigencias energéticas de la raza unicelular no iban a poder ser satisfechas partiendo tan sólo de la fermentación y descomposición del sulfuro de hidrógeno; en consecuencia, no existía otra alternativa que la de recurrir al uso de un material básico económico como el agua: no iba a existir ningún riesgo de contaminar el ambiente con los productos de desecho de la fotosíntesis, puesto que el tal venenoso oxígeno resultaría inmediatamente secuestrado por el hierro bivalente. Por otra parte, cualquier preocupación en el sentido de que las reservas existentes de este hie-

rro pudieran quedar pronto agotadas carecería de base, puesto que tal sustancia sería permanentemente reemplazada con grandes cantidades procedentes del espacio exterior a la hidrosfera.

A tal razonamiento, los conservadores-anaerobios pudieron haber objetado que los procesos de suministro de hierro procedente del espacio no eran todavía satisfactoriamente conocidos; resultaría, pues, imprudente basar todo el suministro energético, para amplios sectores de la comunidad, en un proceso cuya importancia y grado de confianza no resultaban todavía comprendidos; si, repentinamente, cualquiera que fuera la razón de ello, quedara disminuido, o incluso interrumpido por completo, el suministro del ion ferroso (bivalente), la única opción posible sería la de elegir entre morir por carencia de energía o debido al envenenamiento por oxígeno.

Las cianofíceas-liberales rechazarían tales objeciones, calificándolas de derrotistas y carentes de una base real, y desde luego no hubieran estado en lo cierto. Pero nadie, ni los más fervientes y visionarios partidarios de la nueva técnica, hubieran osado a predecir entonces que este veneno, producto de desecho de la fotosíntesis, resultaría que, en el futuro, y en realidad tras unos dos mil millones de años, llegaría a ser utilizado por sus propios descendientes para respirar. Todavía era menos previsible que precisamente tal contaminante hubiera facilitado el camino hacia la «conquista del espacio» fuera de la hidrosfera, así como hacia la evolución conducente a los seres superiores y que, por último, acabaría con los dos mil millones de años de dominación mundial de las cianofíceas. No quisiéramos que el lector de este libro interpretara todo lo que acabamos de decir como una especie de alusión subliminal a que los residuos radiactivos que hoy agregamos a nuestro ambiente podrían llegar a ser en el futuro, y tras otros dos mil millones de años, de utilidad en el proceso respiratorio o actuar como fuente de energía para futuros seres, procedentes de nuestra evolución, como los seres actuales son productos evolutivos de las cianofíceas. Quisiera tan sólo subrayar que nuestro medio ambiente es un sistema extraordinariamente complicado, con un complejo entramado de muchos mecanismos de retroalimentación; esto implica que resulte difícil en extremo evaluar las posibles consecuencias y efectos secundarios que pueda ocasionar un nuevo proceso recientemente introducido, de modo que incluso el aspecto más esencial, podría pasar inadvertido.

Si el hombre primitivo hubiese sido capaz de darse cuenta de las consecuencias que su forma de vida podría ocasionar, hubiera podido organizar una audiencia pública, cuando se inventó la agricultura, hace unos diez mil años, para discutir el posible impacto ambiental de la nueva técnica introducida. Entonces, seguramente, los representantes del partido de los cazadores-liberales hubieran puesto de manifiesto, mediante apasionados discursos, que el hombre, por ser diferente de los animales, por andar derecho, no había nacido para doblar su espalda y trabajar en los campos, ni para ganar su pan con el sudor de su rostro. En cambio, los partidarios de una forma de vida biológicamente natural hubieran opinado que alimentarse a base de plantas que sólo se desarrollan cuando son abonadas con excrementos animales resultaba no ya peligroso para la salud, sino también repugnante.

Sin embargo, los representantes del partido de la prosperidad agraria hubieran rechazado, de pleno, tales objeciones; el grato sabor de los fresones y los huevos de codorniz son algo que está muy bien, hubieran dicho, pero tales exquisiteces naturalmente producidas, por sí solas, no hubieran sido nunca capaces de alimentar a toda la gente, salvo en el caso de que fuera admitida una planificación familiar, basada en el asesinato legal de los recién nacidos. Además, los representantes de los cazadores no hubieran ocultado el hecho de que las persistentes sequías y las excesivas y altas capturas logradas determinaban que las posibilidades de caza hubieran quedado tan disminuidas que iba a surgir la necesidad de cazarse unos a otros; sin entrar a discutir acerca de las calidades gastronómicas y digestivas de la carne humana es evidente que únicamente la invención de la agricultura pudo hacer posible una combinación humana y económica de la guerra con el adecuado suministro de alimentos, de modo que un prisionero de guerra, que después de todo es un ser humano que anda derecho, ya no será más utilizado para mejorar el menú, aunque sea a cambio de tener que trabajar en el campo; de este modo será capaz de producir mayor cantidad de alimentos de los que requiere para su propia existencia, y más también de lo que podría representar su propio cuerpo, en caso de que fuera a servir de simple alimentación ajena. Cabría, pues, prever que en el futuro las guerras no iban a seguir siendo necesarias para el simple objetivo de garantizar la ración de carne con la de prisioneros, o para ocupación de un cierto terreno de caza, sino tan sólo para redimir a los hambrientos de su

triste existencia de caníbales, para convertirlos en genuinos esclavos, bien alimentados, de una floreciente comunidad agraria.

De esta forma podrían haber razonado los partidarios de la recién introducida agricultura, y al final su postura hubiera resultado acertada, aunque ni ellos, ni sus más severos críticos hubieran sido capaces de predecir que con la introducción de la agricultura se ponía en marcha una reacción en cadena, en la que, por un lado, se iban resolviendo uno tras otro los problemas, pero a costa de que se fueran creando también otros nuevos y más graves. No podían haber previsto que con la agricultura se iba a iniciar un aumento explosivo de la población mundial, en forma de un incremento en un factor igual a 1.000 en el transcurso de los mil años siguientes; ni tampoco que el intento de alimentar a esta población hambrienta y en constante crecimiento llevaría, una y otra vez, a determinar nuevos y más importantes impactos sobre el medio ambiente, hasta el extremo de llegar a cambiar la faz de la Tierra, haciéndola irreconocible y, lo que es peor, sin que a pesar de todo, no obstante, la miseria y pobreza pudieran ser erradicadas...

Si nosotros, la humanidad actual, fuéramos genuina- mente humanos y no nos preocupáramos de modo exclusivo de las consecuencias de nuestras propias actividades, sino que, además, sintiéramos compasión de los necesitados, juzgaríamos que la miseria del Tercer Mundo resulta intolerable y haríamos todo lo que fuera posible para ayudar a las gentes de la Tierra a fin de garantizarles, tan pronto como fuese posible, una existencia digna; ahora bien, si tuviéramos que intentarlo a base del progreso técnico de que gozamos los habitantes de los países industrializados con nuestra considerable riqueza (por lo menos, comparativamente con la que poseen los países en vías de desarrollo), tal vez nos enfrentaríamos con el difícil dilema de tener que optar entre un mal conocido y otro que no lo es del todo. Podríamos, probablemente, llegar a destruir nuestro ambiente hasta el extremo que bien pudiera darse el caso de que incluso quedara amenazada la posibilidad de garantizar una mínima existencia digna para *todos* los habitantes del globo.

Esta es la trampa en que nos hemos metido y de la que tenemos que salir por nosotros mismos, tal como hizo el Barón Münchhausen, y a fuerza de nuestro propio ingenio; ésta es la verdadera razón por la que resulta tan difícil encontrar una solución satisfactoria a los problemas ambientales que hemos venido planteando en este libro.

En realidad, es evidente que para eludir el riesgo de ir incrementando la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera, simplemente tendríamos que parar el ritmo de crecimiento del consumo energético, con lo que, además, disminuiría también la polución debida a los óxidos de nitrógeno; ello no implica necesariamente que nuestro nivel de vida no pueda ya mejorar algo más en el futuro, puesto que estamos habituados a derrochar tanta energía y es indudable que cabría sacar mucho más partido de la misma gracias a una mejor utilización. Para poder llevar adelante tal programa es evidente que habría que superar una gran oposición procedente de ciertas personas inflexibles; por ejemplo, en la República Federal Alemana fue imposible mantener la velocidad límite en las autopistas que había sido introducida a raíz de la crisis del petróleo, aunque tal medida podría haber ahorrado energía y dinero, así como disminuido los casos de accidente; en los Estados Unidos, la propuesta del presidente Carter de imponer altas tasas para los automóviles con elevado consumo de combustible no logró satisfacer al Congreso. Sin embargo, cualesquiera que sean las dificultades que realmente puedan existir es indudable que cabe imaginar que los países altamente industrializados podrían seguir subsistiendo sin tener que recurrir a un apreciables incremento del consumo energético.

En países tales como la India, sin embargo, se utiliza *menos de una décima parte* de la energía, por habitante, de lo que corresponde a la República Federal Alemana y menos de la treceava parte de la correspondiente a Estados Unidos, y tales datos incluyen la combustión de la madera y estiércol que representa la *mitad* de las necesidades energéticas del país. Carece totalmente de realismo tratar de imponer un ritmo de crecimiento nulo en relación al consumo energético de dicho país, o incluso simplemente un crecimiento cero per cápita, ya que esto todavía acarrearía, en el transcurso de unos veinticinco años, una duplicación del consumo total de energía. En la mayor parte de los países del Tercer Mundo, que en conjunto constituyen unas tres cuartas partes de la población mundial, la situación es similar a la de la India. Resulta virtualmente imposible, sin recurrir a una expansión múltiple del presupuesto energético mundial, hasta que venga a representar un múltiplo notable del actual, poder facilitar, a todos los habitantes de tales naciones, incluso las más elementales condiciones capaces de garantizarles una existencia con un mínimo de dignidad.

No obstante, si tal incremento de la producción de energía se basa principalmente en la utilización creciente del carbón y otros combustibles fósiles, es probable que nos veríamos enfrentados a todas las consecuencias que ya fueron detalladas en este libro: aumento drástico del contenido del dióxido de carbono en la atmósfera y los correspondientes cambios climáticos que, a su vez, afectarían más seriamente a los países en vías de desarrollo: un crecimiento de la abundancia de los óxidos de nitrógeno, destrucción del ozono e intensificación de la radiación ultravioleta; en consecuencia, ¿nos veremos obligados a ahuyentar los diablos que surgen del uso de los combustibles fósiles con el superdiablo de la energía nuclear?

5.2. DESPUES DE LA PROXIMA ERA GLACIAL

El plutonio que se produce en considerables cantidades en cada reactor de uranio no es, desde luego, un producto de desecho radiactivo; mejor podemos decir que se trata de un producto altamente codiciado, tanto con vistas a su utilización militar como civil. En los Estados Unidos, los primeros reactores nucleares comenzaron a entrar en servicio, durante la Segunda Guerra Mundial, con objeto de producir el plutonio que se requería para la construcción de la bomba que destruyó la ciudad japonesa de Nagasaki. El primer reactor nuclear importante destinado a fines «pacíficos» entró en servicio en Calder Hall, Gran Bretaña, y en la actualidad constituye una instalación de múltiples propósitos, pues produce, a la vez, electricidad para el público y plutonio para fines militares; el proyecto original de este reactor tuvo incluso que ser modificado en forma que resultaba menos ventajoso para la producción de electricidad, debido a que el Estado Mayor exigió mayor cantidad de plutonio [198]. En este libro no vamos a perder el tiempo en discutir si los muchos países en los que hoy se pretende poseer plantas nucleares productoras de energía están realmente interesados en la utilización pacífica de la energía atómica.

Sin embargo, realmente el plutonio no se utiliza únicamente como material básico para la fabricación de armas nucleares, sino también como combustible en los reactores nucleares. Para ambos tipos de aplicación el

[198] K. E. JAY, Calder Hall, British Atomic Energy Department, 1956; véase también K. E. JAY, Britain's Atomic Factories: The Story of Atomic Energy Production in Britain, HMSO, 1954.

plutonio tiene que ser separado de los elementos combustibles agotados. En plantas procesadoras totalmente automáticas, y con las técnicas reprocesadoras actualmente existentes, se consigue extraer algo más del 98 por 100 del plutonio, mientras que el resto queda ligado a los residuos nucleares.

En los reactores de agua ligera, que es el tipo más corrientemente utilizado en los Estados Unidos, República Federal Alemana, y la mayor parte de los restantes países «nucleares», la producción anual de plutonio viene a ser de 0,2 kg por megavatio de capacidad instalada; los reactores nucleares de potencia son del orden de los 1.000 megavatios, e incluso algo más, lo cual representa una producción de plutonio que, por lo menos, es de unos 200 kg anuales. La vida media de tales reactores puede cifrarse en unos treinta años, de modo que en el transcurso de este tiempo producirá unas 6 toneladas de plutonio, de las cuales algo más del 98 por 100 podrá ser extraído en las instalaciones reprocesadoras; el resto, de 60 a 120 kg, permanecerá unido a las cenizas o residuos nucleares y tendrá que ser almacenado en un lugar que ofrezca absolutas garantías de seguridad, en espera de que vaya desapareciendo su radiactividad.

El plutonio, a escala de tiempos geológica, es un elemento radiactivo de vida corta; en el caso del plutonio-239, que es el isótopo más abundante, posee una vida media o período que es «tan sólo» de veinticuatro mil años; esto quiere decir que tal tiempo es el que se requiere para que la mitad de una cierta cantidad de plutonio se transforme en plutonio-235, con lo cual la mitad de su radiación inicial habrá también desaparecido. Los otros isótopos tienen vidas medias o períodos más cortos; el plutonio-240, por ejemplo, tiene una vida media o período de 6,6 mil años. Por cada tonelada de plutonio-239 que hoy día se produce, transcurridos un millón de años (cuarenta veces el período), subsistirá, tan sólo, una millonésima de gramo. Así pues, si la Tierra hubiera contenido plutonio en el instante de su formación, tal elemento radiactivo hubiera desaparecido hace tiempo.

No obstante, de acuerdo a la normal escala humana de tiempos, veinticuatro mil años realmente representa un intervalo de tiempo muy largo; los primeros seres de nuestras propias especies surgieron sobre la Tierra hace algo así como unos cincuenta mil años; si el plutonio-239 se hubiera producido al mismo tiempo, aproximadamente un 25 por 100 de su radiactividad inicial subsistiría todavía en la actualidad. Las pirámides de Egipto

tienen una antigüedad superior a los cuatro mil años; si quienes las construyeron hubieran almacenado en ellas plutonio, su radiactividad hubiera disminuido, desde entonces hasta hoy, en tan sólo un 10 por 100.

Algunos científicos predicen que en la actualidad nos hallamos en vísperas de una nueva era glacial. Si tal pronóstico resultara correcto, y si no se produjera un excesivo calentamiento del ambiente, en virtud de las actividades humanas, capaz de contrarrestar tal tendencia, podría suceder que los depósitos de almacenamiento para residuos radiactivos que se proyecta construir en Alemania, en unas minas de sal situadas en las tierras bajas del norte del país, quedaran cubiertos por los hielos en el transcurso de los próximos mil años. De acuerdo con la pasada historia de las eras glaciales, tal capa de hielo pudiera muy bien persistir a lo largo de unos cuarenta mil años. Si por aquel tiempo, al comenzar a retirarse la cubierta de hielos, el hombre tratara de repoblar tal zona, el plutonio que hubiera ido siendo almacenado, en el transcurso de unas pocas décadas de nuestros días, a razón de unos 100 kg por reactor, y que se encontraría disperso entre las cenizas radiactivas, poseería todavía un 25 por 100 de su radiactividad original. Así pues, tras la próxima era glacial continuaría siendo una sustancia letal... ¿y quién podría saber con exactitud el lugar preciso en que tan terrible material había sido almacenado, antes de que la región quedara cubierta por los hielos?

En opinión de BRODA: «El plutonio es algo terriblemente tenaz, ya que una vez que se incorpora al ambiente resulta imposible librarse de él, de modo que cabe preguntarse si realmente tenemos derecho a echar, sobre unos miles de futuras generaciones, la responsabilidad de mantenerse en guardia ante tal sustancia tóxica.»

El profesor BRODA es un experto en energía nuclear, de cuya autoridad no cabe dudar y, según sus propias palabras, «Desde el atardecer de un día neblinoso del invierno de 1941, en que penetré en la parte vieja del Cavendish Laboratory para incorporarme y tomar parte en el proyecto británico para la utilización de la energía nuclear, estuve siempre, en una u otra forma, en relación con dicho campo». Por nuestra parte añadiremos que preparó un curso práctico sobre química nuclear en la Universidad de Viena, trabajó como experto oficial en energía nuclear, fue miembro de la Comisión Oficial para la Protección Contra Radiación de la República Austríaca, durante más de quince años; fue también informador oficial sobre cuestiones de energía nuclear en la Conferencia Mundial de la Energía,

actuó en el comité editorial de diversas revistas científicas sobre ciencias nucleares, es autor de muchos libros científicos y populares, así como de artículos sobre estas cuestiones, y se dedicó también a la enseñanza de las mismas, en Asia y África, por encargo de la Agencia Internacional de Energía Atómica; pues bien, según sus propias palabras: «Como muchos científicos de mi generación, comencé siendo un entusiasta de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, e incluso ahora no me considero totalmente opuesto a ellas; sin embargo, gradualmente fue desarrollándose en mí una actitud crítica y, en la actualidad, mi escepticismo se ha acentuado notablemente.»

Tratándose de un experto consciente de los problemas, no niega las muy serias dificultades que surgirían, en relación a los suministros mundiales de energía, si se detuviera inmediatamente la producción de energía nuclear; principalmente está preocupado acerca de las perspectivas a largo plazo o posibilidad de que, en el próximo siglo, las crecientes demandas de energía se afrontaran, en su mayor parte, mediante energía nuclear, y especialmente por los reactores denominados «reproductores de plutonio», es decir, capaces de producir mayor cantidad de plutonio de la que utilizan como combustible nuclear.

En su opinión, «Aun en el supuesto de que todos los problemas que hoy constituyen el tema principal de discusión, tales como los posibles accidentes en los reactores, la descarga del material radiactivo durante su rutinario funcionamiento, cuestiones relativas al enfriamiento del agua, etc., pudieran ser satisfactoriamente resueltos, lo cual, por desgracia, no resulta un supuesto totalmente realista, tal expansión de la producción de energía nuclear crearía nuevos problemas a un nivel incluso superior y que, a mi juicio, serían *virtualmente insolubles;* por tanto, considero que deberían tomarse, a tiempo, precauciones y tratar de impedir, a toda cosa, que siguiera prosperando la denominada economía del plutonio', según la cual la producción de energía, y, por ende, de toda la economía, está basada ampliamente en el plutonio» [199].

Por cierto que tal opinión está en perfecto acuerdo con las resoluciones tomadas en las Conferencias de Pugwash, reuniones de notable prestigio,

[199] Véase E. BRODA, *Naturw., Rdsch., 28*, 233, 1975.

donde los científicos del Este y Occidente han propugnado que «la extensión y duración de la actual dependencia de la civilización, respecto a la fisión nuclear, debería mantenerse a un nivel mínimo» [200].

Particularmente, resulta preocupante que con la creciente expansión de la tecnología nuclear, más y más países van teniendo acceso a las armas nucleares; al ir tratando cada país de llegar a ser independiente del mercado mundial del uranio y al procurar eludir los riesgos de accidentes que implica el transporte a gran distancia de los materiales altamente radiactivos que son los elementos combustibles agotados, irán surgiendo, más y más países, o grupos de ellos, que procurarán, inevitablemente, establecer sus propias instalaciones destinadas al enriquecimiento del uranio y al reprocesamiento de los elementos combustibles agotados. Con ello, dentro de un corto espacio de tiempo, cada una de tales plantas nucleares, incluso en el caso de que no fuera éste su propósito inicial, podrá convertirse en una factoría capaz de producir materiales básicos para la fabricación de bombas nucleares. No es, pues, de extrañar que un grupo de estudio, comisionado por la American Ford Foundation, formado por científicos altamente calificados, procedentes de distintos campos, incluyendo físicos, biólogos, expertos en política científica, juristas y economistas, llegara a una sensacional conclusión, que fue publicada en un informe aparecido a principios de 1977, según la cual los propios Estados Unidos, si fuera necesario, deberían estar dispuestos a renunciar a sacar partido de «la limitada ventaja económica» que representa el aprovechamiento de la energía nuclear, con tal de que con ello fuera posible prevenir la posterior proliferación de armas nucleares [201].

El presidente Carter actuó más o menos de acuerdo con tal consejo cuando retuvo el apoyo financiero del Gobierno para la construcción de

---

[200] *24 Conferencia de Pugwash sobre Ciencia y Problemas Mundiales,* Badén, Austria, 1974. Las Conferencias de Pugwash son discusiones sin carácter oficial entre científicos del Este y del Oeste y del Tercer Mundo sobre problemas relativos a las armas nucleares y, en particular, al desarme; contribuyeron notablemente en la preparación del tratado de prohibición de ensayos nucleares. Pugwash es un balneario canadiense en donde tuvo lugar la primera de las conferencias, en 1957.

[201] Ford Foundation/MITRE Corporation, *Nuclear Power: Issues and Choices,* Ballinger, Cambridge, Mass, 1977; véase F. BARNABY, director del Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI), *New Scientist,* 75, 168, 1977.

una planta civil de reproceso y para el programa de reactores reproductores. La administración Reagan, no obstante, revocó tal decisión y trata de seguir adelante con ambos programas; la razón para tal cambio de política fue claramente mencionada: el equipo Reagan está preocupado pensando que podría no ser capaz de conseguir bastante plutonio para su amplio programa de rearme nuclear [202].

Los países del Mercado Común Europeo, por su parte, nunca estuvieron bien dispuestos a seguir los puntos de vista de la administración Carter en estas cuestiones; Francia, en particular, y también la República Federal Alemana manifestaron que para ellas resulta imprescindible el desarrollo de los reactores reproductores de plutonio, dado que no disponen ni de grandes reservas de combustibles fósiles, ni de uranio barato, contrariamente a lo que ocurre en los Estados Unidos; por otra parte, no están dispuestos a quedar marginados del campo exportador de tecnología nuclear, incluyendo las plantas de reproceso tales, por ejemplo, como las que fueron vendidas al Brasil. A pesar de las negociaciones secretas que se han prolongado a lo largo de varios años, fracasaron hasta el momento todos los intentos de lograr un acuerdo entre los países exportadores de reactores, con objeto de poner fin a la posible proliferación de armas nucleares.

Aparte del riesgo de que cada vez más países tengan acceso a las armas nucleares, la proliferación, a escala mundial, de la tecnología nuclear, traería consigo otros problemas muy graves a largo plazo, ya que la necesidad de proteger adecuadamente una cantidad creciente de reactores nucleares, así como otras instalaciones análogas, contra saboteadores, terroristas, gánsgters y lunáticos, podría dar lugar a que se produjera un desarrollo político que condujera a un estado policíal [203]. Finalmente, el plutonio no es tan sólo un material básico para la fabricación de bombas, sino que además, en palabras de BRODA, «es realmente una sustancia diabólica, desde el punto de vista de la protección contra la radiación, pues de todos los materiales producidos en grandes cantidades es, con gran diferencia, el más tóxico». Este elemento químico, producido en cada reactor de uranio, es un intenso emisor de partículas alfa, y aunque resulta relativamente fácil

---

[202] C. NORMAND, *Science, 214,* pág. 307, 1981, citando palabras del Secretario para la Energía de Estados Unidos, J. B. EDWARDS; C. JOYCE, *New Scientisí, 92,* pág. 360, 1981.

[203] Véase el «Flowers Report» frecuentemente citado, *Nuclear Power and the Environment,* HMSO, Comm. Paper Nr. 6618, Londres, 1976.

la protección contra tal radiación, cuando procede de un foco externo viene a tener efectos desastrosos, no obstante, cuando tal elemento se incorpora en el cuerpo, ya que en virtud de su vida media, relativamente larga, la intensidad de tal radiación persiste virtualmente sin llegar a desaparecer a lo largo de la normal duración de la vida humana; en consecuencia, la dosis total de radiación se mantiene en tanto tal elemento subsiste en el cuerpo, de modo que si se inhala polvo que contiene plutonio, aunque tan sólo unas pocas partículas de polvo queden retenidas en el tejido pulmonar, es probable que faciliten al desarrollo de un proceso canceroso; si el plutonio se incorpora al flujo sanguíneo, o si penetra en el cuerpo a través de los alimentos, queda depositado principalmente en la médula ósea y el hígado, órganos ambos particularmente sensibles a la radiación. Por tal razón, la Comisión Internacional de Protección Radiológica fijó un límite superior que puede ser tolerado por las personas que trabajan con plutonio, en un nivel extraordinariamente bajo, de 0,6 millonésimas de gramo, lo que corresponde a una dosis que resulta ser cinco veces inferior a la fijada para el propio radio.

Si el suministro mundial de energía fuera a basarse principalmente en la energía nuclear de la fisión se producirían muchos miles de toneladas de plutonio, que tendrían que ser transportadas y sometidas a proceso químico cada año; ocasionalmente, algún accidente sería inevitable, y a consecuencia del mismo parte de tal material escaparía hacia el ambiente, sin que hubiera forma práctica de limpiar las áreas contaminadas, pues todo lo que cabría hacer sería mantenerlas cerradas, durante algunos centenares de miles de años, tomando las debidas precauciones para evitar que el polvo conteniendo plutonio, o el agua contaminada procedente de tales zonas prohibidas, fuera capaz de llegar hasta las zonas habitadas vecinas. Pero si la citada «economía del plutonio» tuviera que mantenerse a lo largo de varias décadas, o incluso siglos, como pretenden sus más decididos partidarios, con el tiempo cada vez más regiones irían quedando contaminadas, con lo cual difícilmente sería posible evitar que fuera aumentando la carga global de plutonio que se iría acumulando, lo cual resultaría ser un proceso totalmente irreversible, a la escala de tiempos correspondiente a la historia humana, pues basta recordar, como decíamos antes, que es preciso que transcurran veinticuatro mil años para que la radiactividad del plutonio quede reducida a la mitad.

Queda fuera del propósito de este libro presentar, en forma algo completa, argumentos a favor y en contra de la energía nuclear; en relación al tema de que nosotros nos ocupamos, el problema que interesa es el que pudiera surgir a largo plazo, es decir, la cuestión de si sería, o no, posible y razonable contrarrestar el amenazante incremento del dióxido de carbono atmosférico mediante un rápido despliegue mundial de la utilización de los reactores nucleares; en esta sección hemos abordado algunas de las razones por las que muchos científicos, competentes y responsables, rechazan tal solución... pero ¿tenemos otra alternativa?

5.3. ¿UNA TERCERA ALTERNATIVA?

Incluso en el caso de que resultara cierto que hay que optar entre la economía del plutonio o quemar tanto combustible que el incremento del dióxido de carbono pueda llegar a determinar graves cambios climáticos, quedaría aún por contestar la cuestión de decidir cuál, entre los dos males, puede resultar menor.

Cuando me preguntó el climatólogo alemán HERMANN FLOHN si consideraría «aceptable» la presencia de lagos salados en la proximidad de Viena, mi respuesta fue que, en realidad, ya existían actualmente tales lagos tan sólo a 50 km de Viena, cerca de la frontera húngara, donde, no obstante hoy la gente vive decorosamente y no como si fueran nómadas árabes; desde luego, un cambio gradual hacia un clima tal como el húngaro, o incluso peor, por las planicies austríacas, sería motivo de grave preocupación, pero en nuestra opinión no sería peor que una lenta pero segura acumulación de contaminación debida al plutonio.

Sin embargo, sobre esta cuestión las opiniones difieren notablemente; para FLOHN, el riesgo de una amplia utilización del combustible fósil es «por lo menos» tan grave como el que entraña el uso de las centrales nucleares productoras de energía, ya que en éstas, en su opinión, por lo menos pueden hacerse técnicamente mínimos [204]; por otra parte, su colega americano STEPHEN SCHNEIDER, a pesar de haber estado constantemente urgiendo en la reunión de trabajo de la IIASA en el sentido de que no subes-

[204] H. FLOHN, *Umschau*, 77, 569, 1977.

timaran los peligros climáticos, aunque por el momento no puedan ser concretados en detalle, me confesó que «estaba horrorizado» ante la perspectiva de una economía del plutonio sin control regulador.

Debemos subrayar que tales puntos de vista deben ser considerados más bien como opiniones personales que como juicios de expertos científicos, ya que, incluso descartadas todas las imprecisiones inherentes a la tarea de evaluar una previsión, es evidente que existe un «método científico» capaz de comparar objetivamente las consecuencias de la contaminación por plutonio, y todas sus secuelas, como el aumento en la incidencia del cáncer, leucemias, enfermedades hereditarias, etc., con las consecuencias climáticas motivadas por el aumento de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera y sus hijuelas resultantes, tales como dificultades económicas, cosechas perdidas, hambre, etc. La comparación sólo puede ser establecida a través de un juicio personal de valores, y esto, a fin de cuentas, no puede considerarse como una valoración puramente científica.

Pero, ¿es que no existe *realmente* otra posible elección más que entre la economía del plutonio o la peligrosa acumulación en la atmósfera del dióxido de carbono, al tratar de obtener «suficiente» energía para todos? Tras meditar sobre esta cuestión y estudiarla durante varios años, ahora estoy convencido de que no estamos verdaderamente enfrentados con la necesidad de hacer tan horrenda elección, ya que existen otras salidas ante el dilema y tenemos la posibilidad de conseguir un mundo con un aceptable suministro de energía en un ambiente que no resulte contaminado por el plutonio, ni amenazado por catástrofes climáticas, y que todo ello puede sernos asequible a un precio razonable, frente a las otras alternativas, tanto en términos de costes, como de «calidad de vida».

Con objeto de hallar tales salidas debemos tratar antes de cuatro cuestiones:

1. ¿Cómo es probable que evolucione la demanda de energía en el transcurso de los próximos cien años?
2. ¿Cuál es el alcance real y la *urgencia* del problema del dióxido de carbono?
3. ¿Existen formas alternativas de suministrar energía sin que tengan lugar emisiones de plutonio o de dióxido de carbono y, *cuándo será posible disponer de ellas*?

4. ¿Es posible salvar este intervalo de tiempo, hasta que tales alternativas puedan ser ampliamente desarrolladas, sin tener que recurrir a producir un intolerable incremento de la carga de dióxido de carbono en la atmósfera?

Por lo que a la primera cuestión se refiere hay que aclarar, desde el principio, una cosa: no resulta desde luego aceptable una «solución» del problema del dióxido de carbono basada en perpetuar el subconsumo actual de los países en vías de desarrollo, ya que, como escribe ULRICH HAMPICKE, de la Universidad de Essen: «Una renuncia a escala mundial al incremento de la producción de energía conduciría a catástrofes sociales tan insoportables como las de tipo climático que, en caso contrario, se producirían; incluso un mar Ártico libre de hielos representaría unas consecuencias menos importantes que una guerra mundial, entre pobres y ricos, que vendría a ser, probablemente, el resultado de las luchas que se producirían para lograr una redistribución de los recursos» [205].

En los países del Tercer Mundo resulta virtualmente imposible establecer y garantizar unas condiciones de vida que sean algo dignas, sin contar con un aumento masivo del consumo energético. No obstante, en los países más altamente industrializados no existe ninguna ley irrefutable que establezca que el crecimiento económico, e incluso la misma elevación del nivel de vida, deba estar estrechamente vinculado a un constante incremento del consumo de energía [206]. En los Estados Unidos, el consumo energético per cápita viene a ser alrededor del doble que el correspondiente a Suecia, mientras que el nivel de vida resulta ser prácticamente el mismo en ambos países y, desde luego, existe menos genuina pobreza en el benefactor y próspero estado sueco. En consecuencia, las previsiones iniciales acerca de las necesidades energéticas mundiales, basadas en el «derroche de energía» típico de los Estados Unidos, hoy deben considerarse desorbitadas.

---

[205] U. HAMPICKE, *Umschau*, 77, 605, 1977.

[206] Véase, por ejemplo, Energy Policy Projet of the Ford Foundation, *A Time to Choose*, Ballinger, Cambridge, Mass., 1976, página 136.

Ya en 1972, ALVIN M. WEINBERG, el bien conocido físico nuclear americano, conjuntamente con R. P. HAMMOND como coautor, publicó un estudio [207] basado en el hecho de que el estándar de vida, incluso en los Estados Unidos, resultaba insatisfactorio para grandes grupos de población; en su opinión, la saturación en la demanda de energía no se alcanzaría hasta que el consumo per cápita llegara a ser el doble del correspondiente al del año 1970, en los Estados Unidos; esto significaría un consumo, por cabeza y año, del equivalente a 20 toneladas de carbón. Con una población mundial que se pronostica va a ser del orden de los quince mil millones de habitantes a mediados del próximo siglo, los datos anteriores implicarían que el consumo energético mundial se cifraría en el equivalente a los 300.000 millones de toneladas de carbón por año, lo que vendría a ser unas ¡*treinta y tres veces* más que el consumo correspondiente a 1974! El proyecto energético, elaborado por el grupo de la IIASA, llegó, en su tiempo, a cifras no muy inferiores a estas últimas.

En la Conferencia de Dahlem, en 1976, WEINBERG presentó un trabajo, conjuntamente con R. M. ROTTY, cuyas conclusiones eran bastante más modestas, pues predecía que el consumo energético mundial llegaría a estabilizarse alrededor del equivalente a unos 80.000 millones de toneladas de carbón, a mediados del próximo siglo, sin que fueran de esperar posteriores incrementos [208]. Para una población mundial de quince mil millones de habitantes, esto vendría a corresponder a una media global análoga al presente consumo per cápita en Europa occidental.

Entre tanto, también las previsiones relativas al crecimiento de la población mundial han sido corregidas, y van dando cifras menores. Actualmente se citan valores que oscilan *sólo* entre ocho y diez, en lugar de los quince mil millones de habitantes, como población mundial, que se espera para mediados del próximo siglo. Tomando como base esta cifra, y dando mayor importancia a las posibles formas de ahorrar energía en los países de más alto desarrollo industrial, la IIASA llevó a cabo nuevas previsiones:

---

[207] A. M. WEINBERG y R. P. HAMMOND, *Bulletin of the Atomic Scientists*, marzo, 1972, pág. 6.

[208] A. M. WEINBERG y R. M. ROTTY, en STUMM (ed.), *óp. cit.*, página 225. La previsión energética está basada en un trabajo de F. NIEHAUS, *A Non-linear eight Level Tándem Model to calculate the Future CO_2 burden...*, RM-36-35, IIASA, 1976.

Para el año 2030 llega a la conclusión [209] de que la población mundial será de unos ocho mil millones y que el consumo de energía será del orden de los 22-25 mil millones de toneladas equivalentes de carbón [210], que es de tres a cuatro veces el correspondiente a 1975. Esto está en buen acuerdo con una previsión del Instituto Americano para Análisis Energéticos, de las Universidades de Oak Ridge, que predicen demandas energéticas de 27.000 millones de toneladas equivalentes de carbón para el año 2025 [211].

Examinando las previsiones regionales referidas a tales lugares, resulta bastante evidente que las diferencias entre países pobres y ricos serán todavía pavorosamente grandes, incluso dentro de los próximos cincuenta años. El consumo de energía per cápita en el Sudeste de Asia y en el África «negra» se supone que será más del triple, incluso de acuerdo con la baja previsión hecha por la IIASA, lo que corresponde a un aumento del consumo total en un factor 8, si se toma en cuenta el normal crecimiento de la población. Sin embargo, el ritmo de consumo en estos países, en los que dentro de cincuenta años vivirá la mitad de la población mundial, seguirá siendo mucho más bajo que en cualquier otra parte del globo. Aunque es evidente que sería muy deseable que tuviera lugar un crecimiento a un ritmo mucho más rápido, también es cierto que probablemente resultaría falto de realismo suponer que tal cosa puede ser lograda.

Para los países altamente industrializados se predice una duplicación del consumo de energía, de acuerdo con la estima a la baja de la IIASA, e incluso algunos opinan que tal cosa pudiera no ser necesaria. De acuerdo con la opinión de AMORY B. LOVINS, el mayor partidario de que se sigan los caminos dictados por las «energías blandas» o «limpias», el nivel de vida actual de Europa occidental podría mantenerse con la quinta parte del consumo presente de energía, siempre que ésta fuera utilizada racionalmente y conservada en todos aquellos casos en que económicamente fuera posible hacerlo. Así pues, de acuerdo con su punto de vista, cabría mante-

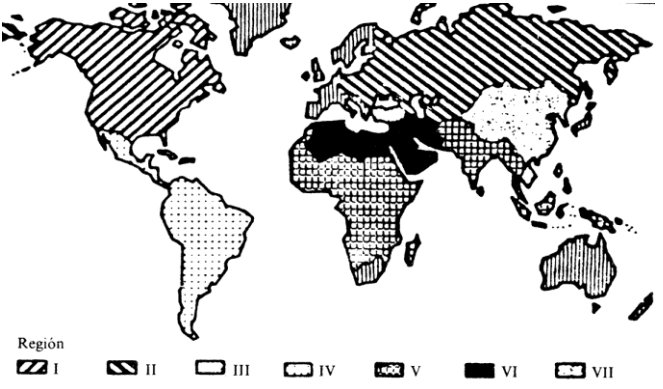
---

[209] W. HAFELE en: J. WILLIAMS (ed.), *Carbón Dioxide, Climate and Society*, Oxford, 1978, pág. 21.

[210] IIASA, Energy in a finite world: Paths to a sustainable Fu- ture, Ballinger, Cambridge, Estados Unidos, 1981.

[211] Véase R. M. ROTTY y G. MARLAND, en BACH, PANKRATH, WILLIAMS, eds., *óp. cit.*, pág. 191.

ner el estilo de vida actual en los países desarrollados y completar la industrialización de los que se encuentran en vías de desarrollo con un consumo global mundial de energía que no llegaría a superar al actual, es decir, de unos 8 000 millones de toneladas equivalentes de carbón [212].



Región	(1)	(2)	(3)
I	315	13,9	4,37
II	480	10,4	5,00
III	767	5,9	4,54
I + II + III	1.562	8,9	13,91
VI	353	3,5	1,23
IV	797	2,9	2,31
IV+V	1.150	6,4	3,54
VII	1.714	1,3	2,29
V	3.550	0,7	2,66
V+VII	5.264	0,9	4,95
Mundial	7.976	2,8	22,4

(1) Población (en millones).
(2) Necesidades mínimas per cápita en km año por año
(3) Energía primaria en Terawatio año por año.

FIG. 18. Las siete zonas mundiales consideradas en los supuestos de la IIASA; I, Norteamérica. II, Unión Soviética y Europa del Este. III, Europa occidental, Japón, Australia, Nueva Zelanda, África del Sur, Israel. IV, América Latina. V, Sudeste asiático y África negra. VI, Oriente Próximo y África del Norte. VII, China y otros países asiáticos con planificación estatal.

[212] A. Lovins, en Bach, Pankrath, Williams, *óp. cit.*, pág. 1.

Aunque este punto de vista fue considerado con cierto escepticismo por los participantes en la Conferencia de Münster, resulta que LOVINS tiene razón cuando dice que las previsiones energéticas han venido reduciéndose reiteradamente durante la última década, y tal vez esté también en lo cierto cuando afirma que irán sufriendo nuevas reducciones en las evaluaciones futuras. Pero, incluso aceptando el panorama, calculado por lo bajo, que ofrece la IIASA, no parece imposible que se logre hallar una solución razonable para los problemas ambientales ligados al consumo de energía.

El pronóstico de ALVIN WEINBERG, de 1972 (incrementar el consumo energético mundial en un factor treinta, en el plazo de cien años), no podría cumplirse, a menos que aceptáramos, de antemano, una pesada carga ambiental, tanto de plutonio como de dióxido de carbono; en cambio, con vistas a lograr una situación considerablemente más modesta, en la que tan sólo se triplicara o cuadruplicara la producción energética mundial, dentro de los próximos cincuenta años, no parece falto de realismo pensar que tal meta puede alcanzarse, eliminando a la vez *ambas* de las amenazas citadas que se ciernen sobre el medio ambiente.

5.4. ¿SE EXAGERA EN DEMASIA LA CUESTION DEL DIOXIDO DE CARBONO?

Cabría pensar que la estimación de las futuras tendencias de las concentraciones del dióxido de carbono en la atmósfera es un tema de la exclusiva competencia de meteorólogos, geofísicos y, posiblemente, también de ecólogos, pero, que desde luego no incumbe a los científicos nucleares. De hecho, sin embargo, el autor de una de las previsiones citadas anteriormente es K. E. ZIMEN, un químico nuclear y antiguo director del Hahn Meitner Institute para investigaciones nucleares, de Berlín. Análogamente, el problema del aumento del dióxido de carbono está siendo estudiado en muchos otros centros de investigaciones nucleares por todo el mundo; las razones justificantes de tales incursiones por campos ajenos de investigación son claramente evidentes. «Deseábamos averiguar hasta qué punto era acuciante, realmente, el problema del dióxido de carbono», me confesaba ZIMEN durante la Conferencia de Dahlem, «Es decir, queríamos conocer con qué rapidez, y hasta qué extremo, la energía nuclear tenía que ser capaz de sustituir a los combustibles fósiles.»

Resulta, pues, comprensible que los científicos relacionados con la energía nuclear consideren el problema del dióxido de carbono desde tal punto de vista; es un hecho incuestionable que los reactores nucleares, frente a las instalaciones convencionales productoras de energía, no desprenden dióxido de carbono en el medio ambiente; en las discusiones relativas a la energía nuclear tal extremo es mencionado siempre por la industria de reactores nucleares como un indiscutible argumento en favor de sus productos, de modo que tampoco resulta sorprendente que la General Electric Company, que es el mayor productor mundial de reactores nucleares, tenga a dos de sus científicos participando en las reuniones de trabajo de la IIASA, donde se discute el problema del dióxido de carbono.

Los representantes de la Asociación de Productores de Carbón de Alemania Federal también estuvieron presentes en tales reuniones de trabajo, y uno de ellos, el Dr. G. ZIMMERMEYER, señaló que los fabricantes de reactores tenían mucho interés en llamar la atención hacia todos los efectos nocivos de los métodos de producción de energía que competían con sus productos en el mercado energético, especialmente desde que el presidente Carter había anunciado su programa energético, basado, principalmente, en la utilización del carbón para la producción de electricidad [213]. Para la industria minera del carbón, las continuas discusiones acerca del dióxido de carbono resultan, desde luego, del todo indeseables. En consecuencia, el Dr. ZIMMERMEYER rogó a todos los participantes en la reunión que trataran de presentar al público estos problemas únicamente en la «forma más responsable», ya que de otra manera la futura construcción de plantas convencionales para la producción de energía tropezaría con los mismos problemas con que se enfrenta actualmente la instalación de reactores nucleares; dado que la General Electric, así como la mayor parte de las otras compañías que fabrican reactores, construyen también plantas convencionales productoras de energía, es de esperar que por su parte habrá una cierta comprensión para tales argumentos.

En el sistema de libre mercado cada uno tiene derecho a anunciar sus productos y, por tanto, a referirse a aquellos hallazgos científicos que hablen en favor de los mismos; nadie esperaría que el responsable de la propaganda de un producto señalara las desventajas del mismo, con el único objeto de mantener una absoluta objetividad científica, de la misma forma

[213] G. ZIMMERMEYER en: WILLIAMS (ed.), pág. 275.

que nadie espera de un abogado que en su alegato de defensa presente material que pueda incriminar a su cliente simplemente para tratar de ser objetivo, pero el carácter complejo de las modernas industrias, tales como la producción de reactores nucleares, con frecuencia implica que sean los propios científicos calificados, en lugar de los agentes de propaganda, los que sean capaces de difundir información especializada.

Este es un problema general en la moderna sociedad, como subraya J. RAVETZ, historiador científico británico; hoy día, muchos expertos capacitados en el terreno de las ciencias naturales no trabajan independientemente, en busca de conocimientos científicos, sino que más bien son expertos contratados por alguna compañía o autoridad, siendo parte de sus propios deberes profesionales tratar de salvaguardar los intereses de quienes los contrataron. De modo que, aclara RAVETZ, si tratáramos de asignarles un papel en la sociedad comparable al que desempeñan los abogados, estaríamos forzándolos, lo mismo que al público, ya que por la propia tradición de su profesión, su entrenamiento vocacional, así como en virtud de la misión que la sociedad espera que lleven a cabo, se supone que un hombre de ciencia se considerará siempre obligado a la más estricta objetividad científica, incluso ante un litigio en el que, indudablemente, actúe representando los intereses de una de las partes; en esto reside la razón justificante del enorme confusionismo reinante [214].

Cuanto mayor sea el número de plantas nucleares de potencia proyectadas, tanto más numeroso será el de compañías y gente interesada en la expansión de la energía nuclear, con vistas a los beneficios y/o sus propias carreras profesionales. Aunque fuera tan sólo por esta razón, los movimientos antinucleares desempeñarían un importante papel en la sociedad, incluso si, a veces, sus razones resultan exageradas y no del todo justificadas, pues actúan a modo de contrapeso de los círculos nucleares, obligando al público a enfrentarse seriamente a este tipo de problema y evitándonos que tengamos que aceptar, a ciegas, la economía del plutonio, que una vez en marcha sería, más tarde, muy difícil de alterar. «Los movimientos antinucleares pueden vanagloriarse de haber conseguido que el gran público tomara conciencia de los problemas relacionados con la construcción de

[214] J. R. RAVETZ, *Scientific Knowledge and its Social Problems*, Clarendon, Oxford, 1971, pág. 348.

las plantas nucleares», afirmó WALTER SCHEEL, presidente de la República Federal Alemana [215].

También gracias a tales iniciativas públicas resulta que la industria nuclear es a menudo acusada de exagerar el problema del dióxido de carbono, pero, en general, los que se oponen a la energía nuclear no son capaces de especificar con detalle sus alegatos; sin embargo, un estudio detallado, tal como se ha intentado hacer en este libro, pone de manifiesto que lo más probable es que surja con el tiempo, seguramente en el próximo siglo, el problema del dióxido de carbono, pero que su *urgencia* resulta con frecuencia demasiado exagerada; tal como afirmó RALPH ROTTY, director del Instituto de Oak Ridge para Análisis Energéticos, y uno de los más distinguidos expertos americanos en temas de energía, durante la Conferencia de Münster, «El desastre no es inminente».

En el supuesto de ritmos de crecimiento en el consumo de combustibles fósiles de acuerdo con los que hoy se consideran más reales, ROTTY fue capaz de probar que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera no aumentará más allá de una tercera parte hasta el año 2025, lo cual puede determinar un incremento de la temperatura mundial de apenas 1°C; aunque esto pueda preocupar a algunos climatólogos no sería lo bastante convincente para justificar que se impusiera cualquier tipo de alteración global de la política energética. De acuerdo con los conocimientos actuales, una duplicación de la concentración del dióxido de carbono no puede esperarse que ocurra antes de muy avanzada la segunda mitad del próximo siglo; así pues, como dijo ROTTY, la principal conclusión es la de que nos queda tiempo por delante. «La necesidad no resulta ser cosa de inmediata urgencia a corto plazo, ni hay que pensar en trazar programas urgentes que posiblemente resultarían mal planteados, y más bien de lo que se trata es de actuar a largo plazo, con programas cuidadosamente desarrollados en el área de posibles alternativas frente a los combustibles fósiles. A medida que las investigaciones vayan proporcionando mejores estimas de las circunstancias, la comunidad científica se encontrará en una postura mucho más firme para reclamar acciones y reglamentaciones, tanto de tipo gubernamental como intergubernamental» [216].

---

[215] Véase *Bild der Wissenschafí*, 3, 64, 1977.

[216] Véase BACH, PANKRATH, WILLIAMS, eds., *óp. cit.*, pág. 191.

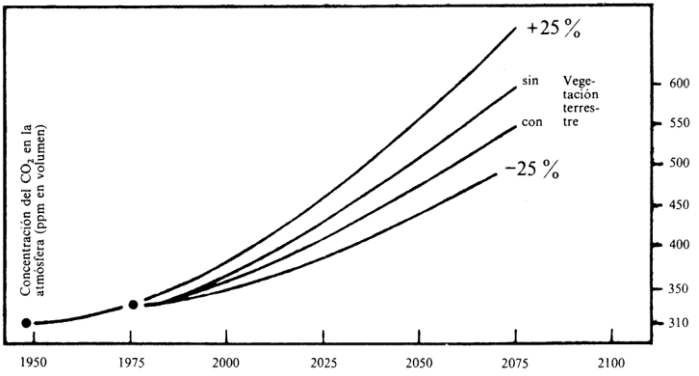


FIG. 19. Valoración de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera según el cuadro trazado por el Instituto de Análisis Energéticos de Oak Ridge; las dos curvas intermedias muestran los efectos en presencia y ausencia de vegetación; las otras curvas indican la incertidumbre, evaluada en un 25 por 100, de las previsiones deducidas por cálculo. En el supuesto de que se produjera un aumento anual del 2 por 100 en la utilización de combustibles fósiles hasta el año 2025, se produciría una duplicación del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera que, en todo caso se registraría por primera vez en la segunda mitad del próximo siglo (de ROTTY y MARLAND, 1980).

Además, si bien es cierto que la cantidad de dióxido de carbono liberado por la eliminación de las selvas tropicales viene a ser tan grande, o por lo menos no mucho menor que la fuente representada por el combustible fósil, y de esto parece existir amplia evidencia (págs. 81-82), resulta de menos importancia conocer exactamente adonde va actualmente la mayor parte de este dióxido de carbono. La fuente representada por las selvas tropicales va a desaparecer, de cualquier forma, en unos veinte o treinta años, debido a que por entonces ya no subsistirán selvas tropicales dignas de tenerse en cuenta (salvo que la absurda y caprichosa destrucción sea detenida antes de tal plazo). Así pues, las simas, dondequiera que se encuentren, ya sea en los océanos, en otras partes de la biosfera o en cualquier otro sitio, serán entonces capaces de alojar mucho más dióxido de carbono procedente de la quema de combustibles fósiles, con lo cual la carga de tal gas en la atmósfera no aumentará en la forma dramática prevista por los modelos geofísicos, lo cual puede proporcionar un compás de espera o respiro, para dar tiempo a que puedan desarrollarse otros sistemas alternativos para la producción de energía.

Vale la pena mencionar que pude oír estos mismos puntos de vista planteados por los participantes de la Conferencia de Dahlem; uno de ellos, cuyo nombre me rogó no citara, pero que desde luego no tiene la menor relación ni con la minería del carbón ni con las industrias del petróleo, me confesó, no sin cierta emoción, que «Todo esto es tan sólo una artimaña de la industria de reactores, ya que todavía no conocemos lo suficiente en relación al verdadero riesgo final del dióxido de carbono; se está investigando a la búsqueda de la 'sima desconocida' que falta, pero tampoco existe un acuerdo ni acerca de la cantidad de dióxido que es realmente liberado ni del lugar hacia el que tal gas va a parar; en consecuencia, las predicciones relativas al futuro ritmo de crecimiento del dióxido de carbono en la atmósfera no viene a ser mucho más que una simple tarea de adivinación, y la cuantía y extensión de los posibles impactos climáticos, temas que todavía son objeto de discusión».

«Pero si aguardamos hasta que todas las cuestiones pendientes reciban la adecuada respuesta con un cierto grado de verosimilitud, podría ser ya demasiado tarde para deducir conclusiones prácticas, ya que los cambios en el sector energético requieren décadas», fue mi objeción.

«En caso de que realmente exista un problema con el dióxido de carbono, no sería urgente antes de que transcurran otros cincuenta años —me replicó—. Y esto no puede utilizarse hoy día como argumentación para detener toda la construcción de nuevas plantas convencionales productoras de energía y recurrir, tan sólo, a la instalación de reactores nucleares.»

«Ciertamente que no, pero ello debería ser una razón para que se iniciara desde ahora mismo una búsqueda de otras posibles fuentes energéticas, imprimiendo a tal propósito un esfuerzo mucho mayor que en el pasado.»

«Desde luego, estoy de acuerdo; lo que se precisa es elaborar un programa de urgencia y desarrollar intensos esfuerzos para tratar de perfeccionar técnicas que permitan utilizar la energía solar.»

5.5. ¿VAMOS A CONTINUAR CON LO DE «UN CABALLO Y UN CONEJO»?

Un viejo y conocido chiste, aunque por ello no menos gracioso, cuenta la historia de un viajero que, en un pequeño restaurante de los Balcanes, pidió pastel de conejo, y cuando se lo sirvieron, el sabor le pareció raro y

poco parecido al del conejo, en vista de lo cual reclamó la presencia del dueño para preguntarle:

«¿Qué me sirven ustedes en este plato?»

«Pastel de liebre, por supuesto, señor.»

«Por favor, no me diga esto; sabe a caballo y no a conejo.»

Al principio, el dueño trató de negarlo, pero al ver que no conseguía aplacar a su huésped, admitió por fin, amistosamente, que había «estirado» un poco el conejo, lo que estaba de acuerdo con las leyes del país.

«¿Qué quiere usted dar a entender con lo de estirado'? —replicó molesto el cliente—. Esto es pura carne de caballo.»

«No, señor —insistió el dueño—; se trata sólo de mitad y mitad, tal como exige la ley, un caballo por cada conejo.»

Esta historia fue recordada en la Conferencia de Dahlem, cuando ALVIN WEINBERG defendió el punto de vista de que *todos* los métodos alternativos para la producción de energía debían ser desarrollados tan intensamente como fuera posible. En respuesta se le dijo que en los Estados Unidos, y no tan sólo en dicho país, los fondos destinados a la investigación se distribuían entre la energía nuclear y las tecnologías restantes, de acuerdo con el principio de «un caballo por cada conejo». En 1975, la Agencia Americana para el Desarrollo e Investigación Energéticos (ERDA) gastó 1.200 millones de dólares en proyectos relacionados con la utilización de la energía nuclear, pero tan sólo 80 millones de dólares en investigaciones relativas a la energía solar, a pesar de lo cual tales cifras representaban un progreso real respecto a lo que venía ocurriendo en años anteriores; en 1974, la investigación sobre energía solar recibió 14 millones de dólares de la ERDA, mientras que la cantidad correspondiente al año anterior fue solamente de 4 millones.

En su trabajo acerca de las posibles estrategias energéticas a largo plazo, presentado en la Conferencia de Dahlem, WEINBERG y ROTTY, como dijimos antes, habían supuesto un techo para el consumo equivalente a los 80.000 millones de toneladas de carbón [217]. En vista del aumento del dióxido de carbono atmosférico, escribían, el carbón no podría ciertamente

[217] A. M. WEINBERG y R. M. ROTTY, en: W. STUMM (ed.), *Global Chemical Cycles and their Alterations by Man*, Berlín, 1977, página 225.

constituir la principal fuente de energía ya que, además, a un ritmo de consumo tan elevado se agotarían pronto las reservas mundiales. Las otras posibles fuentes alternativas, que son relativamente económicas y técnicamente viables, tales como los recursos hidráulicos, energía eólica, energía geotérmica procedente de los géiseres y vapores subterráneos, colectores solares para el calentamiento del agua, etc., quedan todos limitados por las propias condiciones naturales, de modo que únicamente pueden ser capaces de producir una pequeña contribución frente a las enormes demandas globales de energía. Entre las alternativas que realmente serían capaces de suministrar grandes cantidades de energía, la fusión nuclear (o «domesticación de la bomba de hidrógeno») y el uso de la energía geotérmica procedente de las rocas secas y profundas, por el momento no se ha logrado demostrar que puedan ser técnicamente viables. Respecto a la fisión nuclear, y especialmente a los reactores reproductores de plutonio, existen las ya mencionadas reservas, ya que tal vez resultaran demasiado peligrosos; en relación a las plantas de energía solar productoras de energía, según WEINBERG y ROTTY iban a resultar, tal vez, demasiado caras. Personalmente, según explicó WEINBERG a lo largo de la discusión, era de la opinión de que el riesgo inherente a los reactores reproductores de plutonio podía ser reducido a niveles aceptables, por lo que tal solución podría ser, desde luego, la mejor, en las presentes circunstancias; pero como ya comprendía que este punto de vista no iba a ser compartido por la opinión general, la única solución razonable, por el momento, sería la de tratar de desarrollar todas las posibles alternativas con la mayor intensidad.

En los pasillos de la Conferencia de Dahlem se dieron dos explicaciones del hecho de que las consignaciones destinadas a las investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar hubieran sido tan modestas durante muchos años, y ambas resultan ser, probablemente, correctas. La primera sugiere que la industria petrolífera y la de reactores, en varios aspectos íntimamente relacionadas, interpusieron toda su influencia a fin de frenar el desarrollo de otras fuentes de energía, lo cual resulta muy cierto, en particular, con relación a la energía solar, ya que por ser tan fácilmente descentralizable, con ella se lograría reducir el control, por parte de algunas corporaciones altamente centralizadas, sobre importantes ramas del suministro energético. Según la segunda explicación, sucedería que un nuevo campo de investigación, tal como el que se refiere a la utilización de la energía solar, tan sólo puede desarrollarse paso a paso, de

modo que hubiera sido imposible utilizar fructíferamente mayores fondos de los que por entonces se le habían asignado, lo cual, desde un punto de vista puramente comercial, no deja de ser en cierto modo correcto. Un programa de choque, es decir, en el que se pretende forzar el desarrollo, necesariamente implica que debe lograrse ganar tiempo, aun a costa de un dispendio económico superior, y tal política no puede prevalecer, a no ser que tanto el público como las autoridades que han de facilitar los fondos estén convencidos de que la fisión nuclear puede ser, tan sólo, una *solución temporal* con vistas al suministro de energía.

El programa energético del presidente Carter trató de seguir una vía intermedia en tal cuestión. Las ayudas para las investigaciones relacionadas con la energía solar, aunque no se situaban en el *puesto preferente* en la relación de prioridades, fueron aumentadas considerablemente; de la categoría de «conejo» pasó a ocupar, por lo menos, la de «macho cabrío». La administración Reagan ha invertido la situación nuevamente, pues la energía solar apenas recibe atención oficial en la práctica, y resultaría demasiado exagerado decir que la cuantía de los fondos a ella dedicados se ha visto, nuevamente, rebajada a la categoría de «conejo», pues realmente ha llegado a ser del tamaño de un «ratón», con la perspectiva de llegar a convertirse en «mosca».

Mientras que la tecnología de la utilización de la energía solar se mantenga en una fase inicial de su desarrollo resulta muy difícil juzgar si su aplicación generalizada vendría a ser tan cara, como sugieren WEINBERG y ROTTY. De todas formas, a partir de la crisis del petróleo, los precios de los combustibles fósiles, del uranio y de los reactores nucleares crecieron todos a un ritmo superior al de la propia inflación, y tal marcha ascendente es probable vaya a continuar, mientras sucede que muchos componentes usados en el aprovechamiento de la energía solar, y en particular las células fotovoltaicas o células solares, presentan una marcada tendencia hacia precios más bajos. Además, los cálculos en relación a los propios beneficios procedentes de los reactores nucleares son claramente cuestionables, dado que contienen numerosos subsidios, tanto declarados como ocultos, sin los cuales no podrían competir con las plantas tradicionales generadoras de potencia. El uranio enriquecido para los reactores de agua ligera sigue siendo suministrado por las industrias del Gobierno americano (inicialmente establecidas para fines militares) a precio de coste. En la mayor

parte de los países en los que operan los reactores nucleares la cuantía asegurada, en el caso de reactores nucleares, queda por debajo de los daños que probablemente se producirían en el caso de que ocurriera un accidente importante e, incluso parte de la suma corre bajo la responsabilidad parcial del propio Estado. Los costes del desmontaje y cierre de un reactor nuclear agotado no han podido ser establecidos ya que todavía ninguna compañía operadora de plantas nucleares dispone de medios que garanticen almacenaje seguro para los desechos nucleares a lo largo de varios centenares de miles de años; tal lastre es el que vamos a cargar, sin que tengan culpa alguna, sobre las generaciones futuras.

Hablando de la energía solar, WEINBERG planteó la cuestión del almacenaje de la energía durante los períodos de mal tiempo y los correspondientes costes, pero básicamente tal problema surge en *todas* las plantas de potencia, ya que, en virtud de razones técnicas o de otra índole, pueden fallar durante unos días; esto ocurre, especialmente, en el caso de los reactores nucleares, ya que, debido a sus peculiares técnicas, por regla general tienen que interrumpir su funcionamiento, de tiempo en tiempo, durante semanas e incluso meses, sin que por ello se produzcan cortes en el suministro de electricidad. En consecuencia, toda red de suministro debe contener una capacidad de reserva para hacer frente a tales contingencias; incluso en el caso de que la energía solar llegara a ser la mayor fuente productora de energía, esto no significaría que tuvieran que quedar fuera de servicio todas las estaciones, térmicas o hidroeléctricas, productoras de potencia y, además todas las plantas de energía solar de que constara un sistema de suministro de gran potencia es improbable que se vieran afectadas, simultáneamente, durante varios días, por los efectos del mal tiempo.

Una manera particular de utilizar la energía solar, aunque su viabilidad técnica no haya sido todavía demostrada, es la sugerida por BRODA; en ella se recurriría a la producción de hidrógeno mediante la disociación fotolítica del agua, gracias a la radiación solar; en esencia, tal proceso viene a ser análogo a la fotosíntesis que se verifica en las plantas verdes, aunque la idea de BRODA no es una simple copia de lo que hacen las plantas, sino más bien el aprovechamiento de una lección que aquéllas nos dan [218]. La investigación en este terreno resultaría muy económica, dado que en su

[218] Véase E. BRODA, Bulletin of the Atomic Scientists, 3, 49, 1976.

fase inicial apenas requeriría el trabajo de unos pocos científicos calificados para estudiar detalladamente el problema, y tan sólo cuando fueran conocidos los resultados de tal trabajo se podría juzgar si la idea puede llevarse a la práctica a un coste razonable. El hidrógeno obtenido en tal proceso se utilizaría en forma análoga al gas natural, pero con la importante ventaja de que su proceso de combustión no produce dióxido de carbono, sino tan sólo vapor de agua.

«La llama del hidrógeno, a elevada temperatura, ¿no daría lugar a la formación de óxidos de nitrógeno?», pregunté.

«Desde luego, pero en la llama, y esto puede evitarse si el hidrógeno, en lugar de ser quemado, es utilizado en células combustibles, proceso éste que se está desarrollando rápidamente», fue la respuesta. Tal proceso, también denominado «combustión en frío», viene a ser algo inverso a la electrólisis, ya que en estas células el hidrógeno y el oxígeno reaccionan entre sí para formar agua, sin que esencialmente tenga que producirse calor, ya que la energía liberada en el proceso queda disponible en forma de electricidad.

El principal problema actual de la energía solar es el factor tiempo (en el sentido meteorológico); teóricamente, el Sol puede contribuir de modo considerable a la calefacción doméstica, pero para ello es preciso que previamente vayan construyéndose las casas dotándolas del adecuado aislamiento térmico; incluso en el caso de que las normas requeridas para la construcción fueran impuestas por la legislación, indudablemente transcurrirían varias décadas antes de que un buen porcentaje de las mismas se ajustara a tal normalización. Los colectores solares para la obtención de agua caliente para usos domésticos existen ya en el mercado y son utilizados con relativa frecuencia en diversos países, tales como Israel, Japón y Australia; sin embargo, en la mayor parte de los países mediterráneos su utilización es más bien escasa [219].

En 1977 la energía solar cubría tan sólo el 0,005 por 100 de la demanda total de energía en los Estados Unidos, pero, de acuerdo con un estudio relativo a su posible viabilidad futura, hecho por la Oficina de Evaluaciones Tecnológicas, casi el 10 por 100 de las necesidades energéticas del país podrían ser suministradas mediante una explotación descentralizada

[219] Esta afirmación va siendo menos cierta en los últimos años. *(N. del T.)*

de la energía solar [220]. Tal cifra incluye la electricidad producida mediante las células fotovoltaicas, ya que es probable que se pueda disponer de ellas, a un precio aceptable, en un futuro próximo. Pero para alcanzar esta meta del 10 por 100 antes del año 2000, la explotación de la energía solar debería experimentar una expansión de alrededor del 15 por 100 anual, e incluso en el supuesto de que este programa recibiera el máximo apoyo imaginable, habría que poner en duda la viabilidad de tal intenso ritmo de crecimiento.

En diversos países comenzaron experiencias con prototipos de grandes plantas de potencia, a base de energía solar, pero han de transcurrir varios años para que se disponga de suficiente experiencia, y algunas *décadas* antes de que tales nuevas instalaciones puedan extenderse por el resto del globo. Pero cabe preguntarse, ¿de qué forma podemos hacer frente a las exigencias del suministro energético *hasta entonces,* dado que por una parte hemos de tratar de lograrlo sin recurrir a los reactores reproductores rápidos y limitando el número total de reactores de agua ligera mientras que, por otra, hemos de evitar que la carga del dióxido de carbono en la atmósfera supere un cierto nivel tolerable? ¿Va a ser posible disponer del necesario compás de espera, o respiro, que nos permita afrontar el problema?

5.6. UNA ESTRATEGIA PARA GANAR TIEMPO

En opinión de WOLF HÄFELE, presidente del proyecto energético de la IIASA, manifestada en la conferencia inaugural de la reunión de trabajo, sobre el dióxido de carbono, celebrada en Badén, una transición global desde una fuente de energía principal a otra requiere unos cincuenta años, de modo que si las tendencias actuales fueran a persistir, la carga de dicho gas en la atmósfera podría alcanzar un nivel peligroso hacia el año 2030; en consecuencia, en opinión de HÄFELE resulta sumamente urgente, *desde hoy mismo,* comenzar a desarrollar nuevas posibilidades alternativas [221].

---

[220] US Office of Technology Assessment, *Application of Solar Technology of Today's Energy Needs,* Washington, 1978.

[221] HÄFELE.

Es importante destacar que los científicos participantes en la Conferencia de la IIASA no apoyaron la llamada de HÄFELE [222], en el sentido de la urgencia de una acción inmediata; por el contrario, el grupo de trabajo sobre estrategias energéticas, bajo la presidencia de R. M. ROTTY, de las universidades asociadas de Oak Ridge, declaró que las incertidumbres existentes en cada uno de los aspectos del problema del dióxido de carbono eran demasiado grandes para que puedan justificar un cambio importante en las políticas energéticas. «La Humanidad necesita y *puede disponer* de un intervalo de tiempo, de entre cinco y diez años, para llevar a cabo una intensa labor de investigación capaz de reducir el margen de incertidumbres existente —declararon—, y entretanto mantener una política de flexibilidad es la única norma de acción prudente» [223].

El informe del grupo de trabajo hizo hincapié en que «por el momento resulta *prematuro* imponer medidas que implicasen la reducción del uso del carbón y de otros combustibles fósiles... Por otra parte, tampoco está justificada una política que estimulara la utilización del carbón, en virtud de su actual abundancia, preferentemente a la de otros sistemas de suministro no fósiles; tales decisiones político-administrativas pueden resultar difíciles y muy costosas, en caso de precisar una posterior rectificación, en virtud de las tecnologías en continua evolución que se requieren en cada uno de los sistemas de suministro energético». El informe afirmaba que resultaría altamente deseable idear sistemas de suministro que fueran capaces de producir muy poca emisión de dióxido de carbono, o, mejor aún, a ninguna, y/o hallar formas y maneras de mitigar sus indeseables efectos ambientales.

Si la opinión de LOVINS es correcta, nunca surgirá el problema del dióxido de carbono, puesto que el consumo de combustibles fósiles no sería fácil que alcanzara niveles peligrosos; si uno toma un punto de vista más conservador y considera como más reales la predicción de ROTTY O el cuadro descrito por la IIASA, todavía menor, el problema llegaría a hacerse patente alrededor de una época que puede situarse a mediados del próximo siglo, y aunque esto no represente una amenaza *inminente,* podría resultar

[222] HÄFELE.

[223] Informe del grupo III en: WILLIAMS (ed.), pág. 315.

razonable comenzar a investigar ya algunas posibles vías de solución, incluso admitiendo la posibilidad de que en los años venideros puedan variar las estructuras actuales de la utilización de la energía.

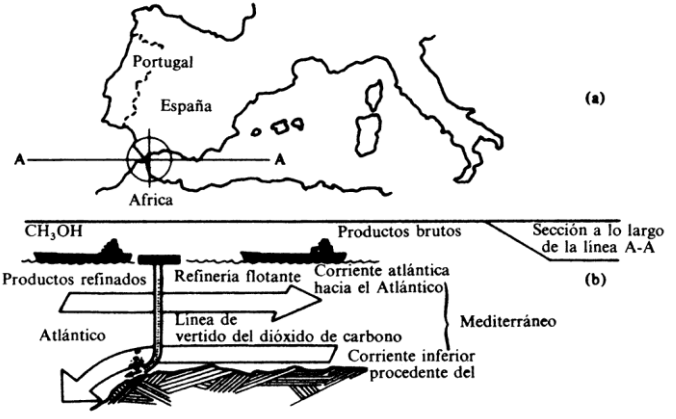


FIG. 20. Esquema de un proyecto destinado a la eliminación del dióxido de carbono mediante su vertido directo en las profundas aguas oceánicas, desde una plataforma flotante que operaría en el estrecho de Gibraltar. La planta podría producir metanol, hidrógeno o energía eléctrica, utilizando combustible fósil como fuente energética, *a)* Emplazamiento, *b)* Esquema. (De MARCHETTI, *Climatic Change.)*

Uno de los proyectos investigados por la IIASA trata de la posibilidad de disolver el dióxido de carbono procedente de las plantas convencionales productoras de energía, así como de otras combustiones importantes, en los océanos; para ello, en lugar de dejar escapar dicho gas y que contamine la atmósfera, sería separado del conjunto de gases emitidos, para ser conducido hasta las profundas aguas de los océanos, no saturadas de dióxido de carbono, y que presentan una capacidad prácticamente ilimitada para poder disolverlo [224]. Habría que operar tales instalaciones en aquellos lugares en los que las propias corrientes oceánicas fueran capaces de arrastrar el gas disuelto hacia las capas más profundas, tal como sucede, por ejemplo, en el estrecho de Gibraltar, donde es muy activa una corriente hacia las profundidades del Atlántico; en base a condiciones adecuadas de

[224] HÄFELE, C. MUSTACCHI y cols., en: WILLIAMS (ed.), pág. 283; C. MARCHETTI, *Climatic Change, 1*, 59, 1977.

este tipo, los costos del proyecto no resultarían prohibitivamente elevados, en opinión de los investigadores de la IIASA; los expertos americanos, al estudiar tales proyectos, llegan a conclusiones diferentes, ya que, según ellos, la captación del dióxido de carbono procedente de la utilización de combustibles fósiles resulta demasiado costosa, tanto en términos energéticos como económicos, incluso en el supuesto de que se dieran las circunstancias más favorables, de modo que tan sólo cabría pensar en recurrir a tal solución como una última posibilidad [225].

Otra solución para eliminar el dióxido de carbono de la atmósfera consistiría en «plantar árboles», pero es tan sólo mencionada de paso en el informe de la USA, y aunque para mí supone una gran satisfacción el hecho de que estas pocas palabras fueran agregadas a petición mía, sinceramente opino que tal alternativa debía haber sido estudiada con mayor extensión. Bien es verdad que a lo largo de toda la reunión de trabajo estuve bajo la impresión de que la mayoría de los expertos en ingeniería, así como muchos otros científicos, especialistas en Fisicoquímica y Geofísica, que intervinieron, se mostraban mucho más preocupados en hallar soluciones de tipo tecnológico a la vez que subestimaban las grandes posibilidades inherentes a una razonable política forestal.

En cambio, en la Conferencia de Dahlem, con una más nutrida participación de ecólogos y otros científicos relacionados con diversas partes de la Biología, se habló bastante más ampliamente de tal cuestión, hasta el punto de que una de las recomendaciones aceptadas fue la de «estudiar las posibilidades de una reforestación masiva y tratamiento de las áreas actualmente deforestadas, junto con una mejora de la economía maderera». Una inversión de la presente tendencia de deforestación, se afirma en uno de los informes de la Conferencia «posiblemente podría proporcionar, dentro de quince o veinte años, una nueva sima biosférica del orden de magnitud de las emisiones actuales... Tal acción, conjuntamente con una amplia economía maderera que permitiera sustituir ciertos materiales estructurales (cemento, aluminio, plásticos) que implican gran consumo de energía, podría ofrecer múltiples beneficios, por lo menos para el período que

[225] Véase C. F. BAES y cols., en BACH, PANKRATH, WILLIAMS, eds., página 495; véase también W. O. ROBERTS, W. W. KELLOGG y cols., Informe del grupo, *ibíd.*, pág. XXXIII.

se requiere antes de que puedan ser desarrolladas otras alternativas energéticas más convenientes, de modo a poder aplazar la actual presión que tiende a forzar la adopción de soluciones nucleares» [226].

Análoga postura fue tomada por uno de los grupos de trabajo de la Conferencia de Münster al afirmar que «algunas de las medidas encaminadas a mitigar el problema del dióxido de carbono tienen otros efectos beneficiosos para la sociedad, de modo que pueden ser mejor y más fácilmente justificadas que por el simple intento de evitar un nuevo aumento en el consumo de carbón o una vuelta a una amplia utilización de la energía nuclear». Como ejemplo de tales medidas sugeridas por el grupo de trabajo, al frente del cual estaba W. O. ROBERTS y W. W. KELLOGG, pueden citarse las siguientes:

— Acabar con la destrucción forestal y estimular la repoblación.
— Conservación de los suelos, para evitar la oxidación del humus.
— Conservación y ahorro de energía mediante el adecuado aislamiento de edificios, etc.
— Utilización de energía renovable en los países en vías de desarrollo en sustitución de la madera o el estiércol, con lo que disminuiría la destrucción forestal y/o se utilizaría el estiércol como fertilizante.

El informe prosigue en los siguientes términos: «Al establecer los riesgos inherentes a la acumulación del dióxido de carbono debe tenerse en cuenta que otras alternativas que no recurren a los combustibles fósiles, y especialmente la llamada «economía del plutonio», también tienen sus riesgos, que son objeto de considerables discusiones; mientras que los climatólogos son expertos en la estimación de los riesgos climáticos, en cambio no lo son *ni están cualificados* para establecer comparaciones entre la importancia de los mismos con los correspondientes a los de tipo nuclear; estos últimos podrán, o no, ser considerados como «peores», ya que tal juicio depende de la escala de valores sociales y económicos que intervenga en la comparación» [227].

---

[226] A. NIR y cols. (informe del grupo), en: STUMM (ed.), páginas 329-321.

[227] W. O. ROBERTS, W. W. KELLOGG y cols., en BACH, PANKRATH, WILLIAMS, eds., *op. cit.*, pág. XXXII.

5.7. LA REPOBLACION FORESTAL: UNA POLITICA QUE REPORTARIA MUCHOS BENEFICIOS

Un amplio proyecto de reforestación a escala mundial no representaría una solución tecnológica, sino que más bien sería un acertado intento de resolver el problema ambiental mediante un retorno a unas condiciones más naturales. *Precisamente por esta razón* el proyecto reportaría muchos otros beneficios ecológicos, con absoluta independencia de que, además, se lograra mitigar el problema del dióxido de carbono.

«Debería concederse prioridad a aquellas medidas tales como la reforestación, que resultan seguras en base a consideraciones ambientales y que tienen un impacto económico relativamente fácil de evaluar en términos de mano de obra, pérdida de terrenos de cultivo, etc.», afirma B. SCHEFOLD, un economista alemán, en un apéndice contenido en el informe de Dahlem. «Al elaborar un programa internacional para la repoblación forestal deben tenerse en cuenta las necesidades, tanto económicas como sociales, de las naciones más directamente implicadas, el desempleo, etc.» [228].

En opinión de GEORGE WOODWELL no cabe la menor duda de que un programa de este tipo, conjuntamente con otro que protegiera la riqueza forestal existente, resultaría efectivo con vistas a la eliminación del dióxido de carbono de la atmósfera. En una carta que me escribió afirma lo siguiente: «La prueba que necesitamos está claramente contenida en los datos relativos a las concentraciones del dióxido de carbono en el aire, obtenidos en Mauna Loa; allí se aprecia (pág. 20) que la periódica reducción anual del dióxido de carbono en la atmósfera viene a representar una disminución de unas 5 ppm; naturalmente, tal descenso es repuesto a lo largo del invierno, cuando la respiración predomina sobre la fotosíntesis. Me atrevería a afirmar que daríamos un paso muy importante hacia la mejora global de la Humanidad tratando, simplemente, de ajustar nuestras actividades de modo que en el futuro no dieran lugar a nuevas destrucciones forestales. Si pudiéramos introducir de inmediato una política de repoblación forestal, estaríamos haciendo una extraordinaria contribución hacia la estabilización de la tierra superficial y de otros componentes esenciales de la biosfera.»

---

[228] B. SCHEFOLD, en: STUMM (ed.), pág. 327.

Cuanto antes comenzáramos, tanto mejor, debido a que los árboles pueden ser mucho más fácilmente plantados en zonas recientemente clareadas, donde todavía hay algo de humus, que en otras donde ya existe una completa erosión. Pero incluso en las montañas que en su tiempo estuvieron cubiertas por la selva y que actualmente son totalmente estériles, puede procederse a la repoblación forestal, siempre que se tomen las debidas precauciones; en Dalmacia, por ejemplo, existen selvas con pinos que, virtualmente, fueron plantados sobre las mismas rocas desnudas; como es natural, hay que transportar tierra para que la plantación sea posible; la figura 20 nos muestra los resultados de tal reforestación al cabo de cincuenta años; es de esperar que vaya acumulándose de manera gradual una nueva capa de humus, protegiendo a los árboles y facilitando el desarrollo de la vegetación junto al suelo. Tal proceso, evidentemente, tiene que ser ayudado por el hombre, por lo menos impidiendo que cabras y corderos se apacienten en zonas recientemente reforestadas.

Durante más de un siglo existieron ya intentos de llevar a cabo, en Dalmacia, una repoblación forestal parcial, pero como sabe muy bien cualquier turista que haya visitado tal país, allí las selvas son muy escasa, y existen grandes extensiones totalmente erosionadas o cubiertas de matorrales; también otras amplias zonas mediterráneas resultan ser muy parecidas.

«Es evidente que la mayor parte de Europa, y especialmente los países mediterráneos, mantiene una vegetación que es el resultado de un excesivo pastoreo, quema reiterada y talas constantes en busca de madera, a lo largo de milenios», escribe WOODWELL en la mencionada carta. Los países del sur de Europa, y más acusadamente todavía los del norte de África, son demasiado pobres para que puedan llevar a cabo, por sí mismos, un programa de repoblación forestal a gran escala. Dichos países son tan pobres principalmente debido a que sus campesinos, durante centenares y miles de años, han venido arrancando de sus tierras tan sólo míseras cosechas en unos suelos rocosos que se secan rápidamente; aquellos tiempos en los que tanto Sicilia como el norte de África eran los graneros de Roma pasaron hace muchos años, ya que durante la antigüedad la fertilidad de tales regiones fue ampliamente destruida por una explotación abusiva del suelo; en muchas emotivas películas del cine italiano se pone de manifiesto documentadamente la pobreza de las gentes que habitan tales regiones, y se

trata de una pobreza que tiene un efecto retroactivo sobre la vida entera del país.

FIG. 21. Reforestación de pinos tipo Aleppo sobre las rocas casi desnudas de la región de Sibenik, en Dalmacia; los árboles fueron plantados a principios de siglo y para conseguirlo hubo necesidad de aportar tierras. (Foto por cortesía de H. LEIBUNDGUT, Institute for Forestry, ETH, Zürich.)

Un ejemplo, tomado de los Alpes Provenzales, en el sur de Francia, pone de manifiesto lo que incluso un solo hombre puede lograr en tal empobrecida tierra; entre 1910 y 1945, ELZÉARD BOUFFIER, un campesino que se había retirado de su oficio de pastor tras la pérdida de su mujer y de su hijo, y habitaba en una remota y estéril región montañosa, se dedicó a plantar, espontánea y gratuitamente, centenares y miles de árboles, y con ello logró crear una selva a lo largo de 30 kilómetros; JEAN GIONO, un

escritor que en una de sus excursiones por las montañas encontró a BOUFFIER en 1913, y posteriormente le visitó en diversas ocasiones, nos describe las actividades de este hombre, y aunque su informe no constituye un documento realmente científico, contiene todos los logros fundamentales alcanzados gracias a la labor de BOUFFIER [229].

Poco después de la Primera Guerra Mundial ya se podían comprobar los efectos de la repoblación forestal a lo largo del valle: «Cuando descendí hacia las aldeas pude ver el agua fluyendo por el lecho de ríos que habían permanecido secos desde tiempo inmemorial; fue para mí la mayor reacción en cadena que jamás había visto»; al final, hasta los expertos forestales se dieron cuenta de la existencia de «una selva natural» que, contra todas las experiencias previas, había comenzado a desarrollarse «por sí misma», hasta el punto de que varias delegaciones acudieron a visitar tal «milagro», y la selva fue declarada santuario... sin que nadie supiera acerca del hombre que la había plantado.

En 1945, GIONO hizo su última visita a BOUFFIER, que por entonces ya tenía ochenta y siete años, con objeto de comprobar los resultados de su trabajo en los valles: «Paré en Vergons, donde en 1913 habitaban únicamente tres personas y se trataba de una aldehuela de una docena de casas; sus habitantes tenían aspecto semisalvaje, con un tipo que física y moralmente recordaba al del hombre prehistórico; las casas, abandonadas, habían quedado cubiertas de punzantes ortigas, y las condiciones de vida parecían totalmente inhóspitas... En la actualidad, la pequeña aldea tiene veintiocho habitantes y cuatro nuevas casas recientemente encaladas y rodeadas por jardines cubiertos de vegetación hortícola... ¡Se había transformado en un lugar en el que uno desearía vivir!»

Y ocho años más tarde: «Nuevas granjas se levantan donde, en 1913, sólo pude ver ruinas; las aldeas gradualmente han venido siendo reconstruidas, y en las calles me tropiezo con hombres, mujeres, chicos y chicas que aprendieron a reír... En consecuencia, más de diez mil personas deben su felicidad actual al trabajo de ELZÉARD BOUFFIER. »

Resulta una simbólica tragedia que tal zona, próspera y pacíficamente desarrollada, no subsistiese por muchos años; en 1970 GIONO tuvo que

[229] J. GIONO, conferencia pronunciada ante la English Society, «The men of the trees» (Título original en francés, «Un caractére»; en alemán, «Der Mann mit den Bäumen»). Traducción alemana por W. TAPPOLET, Zurich, 1972, en particular, págs. 18, 27 y 30.

escribir al traductor alemán de su informe, que había expresado su deseo de visitar la región, que «Desde entonces todo ha cambiado, con vistas a la construcción de silos para armas nucleares, campos de tiro y depósitos petrolíferos... Quedan tan sólo unos pocos abetos y unas pocas manchas forestales con hayas y alisos que lograron sobrevivir» [230].

Las actividades de ELZÉARD BOUFFIER se desarrollaron en una región que todavía no estaba totalmente erosionada; no tuvo que aportar tierra, y su ganado lanar podía pastar por allí; más tarde abandonó su rebaño debido a que los animales dañaban sus árboles, y pasó a dedicarse al desarrollo de colmenas para la obtención de miel, ya que plantar árboles, en cierto sentido, no era más que su *hobby*, pero no la profesión de la que debía vivir.

Su actividad exigía una paciencia sin fin, devoción y perseverancia, ya que, según el propio informe de GIONO, de cada cien árboles que plantaba tan sólo diez lograban seguir creciendo [231] pero gracias a dicho hombre existió, finalmente, una selva donde antes sólo había un pobre terreno de pasto.

Es posible transformar zonas devastadas, e incluso totalmente erosionadas, en nuevas zonas verdes, así como desiertos en prósperas tierras de cultivo, tal como lo ha demostrado reiteradamente la entusiasta juventud de Israel [232], pero todo ello requiere mucho esfuerzo y, a menudo, los beneficios suelen tardar en materializarse.

Una repoblación forestal a gran escala, llevada a cabo con todos los medios que la ciencia y tecnología modernas ponen a nuestra disposición, podría ayudar, probablemente con gran eficacia, a diez mil aldeas de los países mediterráneos, en sus intentos de recuperar nuevamente su prosperidad. La meta perseguida debería ser la creación de tanta selva natural como fuera posible que subsistiera y floreciera por sí misma, de modo que, a su tiempo, tras cien o incluso más años, pudiera rendir una modesta compensación en forma de madera para la construcción; sus beneficios realmente serían, sin embargo, de tipo indirecto: una mejora en la conservación del agua y otras condiciones ecológicas del ambiente próximo y, a

---

[230] *Ibíd.*, citado en el epílogo del traductor.

[231] *Ibíd.*, pág. 13.

[232] Para un informe acerca de una reforestación que también resultó un notable éxito en Corea del Sur, véase E. ECKHOLM, *New Scientist, 82*, 764, 1979.

escala global, un retraso en la marcha ascendente de las concentraciones del dióxido de carbono en la atmósfera.

La repoblación forestal de los países mediterráneos «en nuestra propia puerta» podría constituir el propósito cuidadosamente planificado a largo plazo, a iniciativa de todos los países europeos y, al mismo tiempo, sería un ejemplo a imitar para el mundo entero; tal programa necesitaría algunas décadas para llevarse a cabo, pero incluso en relación a su efecto retroactivo sobre la atmósfera resultaría indudablemente provechoso, puesto que se prolongaría hasta el próximo siglo, época para la que el problema del dióxido de carbono se habrá convertido en algo realmente urgente.

A mediados del presente siglo, las selvas con lluvias tropicales cubrían un área de unos 17 millones de kilómetros cuadrados, lo que viene a representar alrededor de un 11 por 100 de la superficie total del globo terrestre cubierta por tierra; hacia el año 2000, en caso de que persistan las tendencias actuales, la mayor parte de ellas habrán sido eliminadas. Además, existen también otras regiones, como por ejemplo Siberia y el norte del Canadá, en las que evidentemente la tala de árboles avanza a mayor rapidez que el crecimiento de los mismos. Si la Humanidad es capaz de limpiar o talar alrededor del 10 por 100 de la superficie terrestre, en un período no superior al medio siglo, también podría llevar a cabo una reforestación del 2 por 100 de tal superficie en el plazo de veinte o treinta años. Supongamos que la repoblación forestal fuera capaz de crear 1,5 millones de kilómetros cuadrados de nuevas selvas en zonas templadas, siempre verdes (principalmente en áreas donde ya fueron destruidas hace centenas o miles de años, como es el caso de los países mediterráneos), y restablecer alrededor de 1,5 millones de kilómetros cuadrados de selvas tropicales (que fueron destruidas principalmente a lo largo del presente siglo, como por ejemplo, sobre las laderas de los Himalayas); tomando una productividad primaria neta como la que se menciona en la tabla 2, de WHITTAKER y LIKENS, y suponiendo, como primera estimación aproximada, que alrededor del 60 por 100 de tal cantidad permanecería almacenada en las recientes nuevas selvas en crecimiento (puesto que el resto sería reconvertido en dióxido de carbono por la respiración de microorganismos y animales), podríamos concluir que de dicha forma crearíamos una sima capaz de absorber 5.000 millones de toneladas de dióxido de carbono (1.300 millones de toneladas de carbono). Esto viene a corresponder a unas dos terceras partes del actual incremento anual experimentado por el dióxido de carbono atmosférico,

que asciende a unos 8.000 millones de toneladas (2.200 millones de toneladas de carbono).

Evidentemente, serían precisas varias décadas antes de que las nuevas selvas replantadas alcanzaran tal nivel de producción; por otra parte, la sima continuaría existiendo a lo largo de aproximadamente el medio siglo, es decir, mientras todavía estuvieran desarrollándose, para después irse gradualmente desvaneciendo, a medida que alcanzaran su madurez.

Si, además, fuera posible poner fin a la rápida destrucción de las selvas existentes y, como primer paso, se obligara a las corporaciones madereras y a los productores de carbón vegetal a replantar en sus zonas de trabajo, por lo menos, tantos nuevos árboles como fueran los talados, resultaría que una nueva fuente de dióxido de carbono, que en la actualidad es tan importante como la constituida por la quema de combustibles fósiles, podría ser, cuanto menos, evidentemente reducida. Sumando los efectos que sobre la atmósfera pueden determinar la reforestación y la preservación de las selvas existentes no cabe la menor duda de que una razonable política forestal, aunque no fuera una panacea, contribuiría significativamente a frenar la marcha ascendente de la carga de dióxido de carbono en la atmósfera.

Es evidente también que una campaña de repoblación forestal a escala mundial resultaría técnicamente realizable, aunque, como es natural, haría falta un cierto tiempo para conjuntar las experiencias necesarias y hallar la forma adecuada de combinar la ciencia y la tecnología modernas con los conocimientos prácticos tradicionales de carácter local. Además, tal campaña crearía muchos puestos de trabajo para la población rural en los países, más o menos atrasados, que vienen padeciendo de una permanente y estructural falta de empleo; estimular tales esquemas sería una de las formas más positivas de poner en marcha una ayuda y, por cierto también, una *manera perfectamente moral de ayudarse a uno mismo tratando de ayudar a los demás.*

No habría necesidad de amplios acuerdos internacionales para comenzar y poner en marcha algún proyecto piloto; un país que facilitara ayuda para el desarrollo podría reservar cierta parte de sus fondos destinados a esquemas forestales dando a conocer que los países dispuestos a colaborar en tales proyectos recibirían un trato preferencial; evidentemente, la reforestación de unos 3 millones de kilómetros cuadrados que hoy son de tierra desnuda, desde luego implicaría una considerable inversión, pero a largo

plazo el gasto se vería compensado por los propios beneficios obtenidos, y ello *incluso sin tener en cuenta sus efectos sobre el problema del dióxido de carbono.* Resultaría difícil elaborar cálculos exactos costo/beneficios, dado que los principales beneficios consistirían en la prevención de pérdidas debidas a la erosión por aguas o viento, inundaciones, sequías, corrimiento de tierras y avalanchas, así como la evitación de obstrucciones por sedimentación en depósitos y canales de irrigación [233]. El valor de todos estos daños evitados sólo puede ser estimado en forma muy poco exacta, pero cualquier persona que esté familiarizada con tales hechos estará de acuerdo en que los beneficios mencionados son verdaderamente reales y no puramente imaginarios.

La reforestación afectaría a algunas tierras que en la actualidad, aunque precariamente, están destinadas a cultivos, pero si se llevara a cabo de manera correcta, concentrándola en las laderas de las montañas, cimas de las colinas y creando pantallas rompedoras y protectoras contra los vientos en las planicies, determinaría, por sus efectos beneficiosos, un *incremento* de la producción agrícola global.

Todavía resultaría más difícil *demostrar* los beneficios ligados a la suavización del problema del dióxido de carbono, ya que mientras existe mucha gente que conoce a través de sus propias y horribles experiencias las terribles consecuencias de la erosión, etc., capaces de ser evitadas mediante la reforestación, en cambio, nadie ha experimentado todavía, por sí mismo, las consecuencias que pueda tener el aumento de las concentraciones del dióxido de carbono en la atmósfera, y aunque los científicos, en conjunto, parecen estar de acuerdo que tal cosa constituiría un riesgo real, y tal vez incluso un serio peligro, son incapaces de predecir, salvo de forma muy vaga y general, en qué podrían consistir realmente tales peligros.

Por tanto, el problema principal con que puede tropezar un proyecto de reforestación a gran escala pudiera ser el de su viabilidad política. ¿Sería posible convencer a los políticos y contribuyentes de los países ricos para que inviertan considerables cantidades de dinero en tales proyectos, cuyos

---

[233] Según un informe presentado en la Octava Conferencia Forestal Mundial, en Yakarta, la vida de setenta y un depósitos obstruidos por sedimentaciones en la cuenca del río Poza Honda, en el Ecuador, pudo ser prolongada en un promedio de veinticinco años, mediante medidas de conservación del manto acuoso, que costaron, tan sólo, 1 millón de dólares y produjeron beneficios evaluados en 2 millones. N. MYERS, *New Scientist, 80,* 951, 1978.

beneficios sólo se acumularían tras varias décadas? ¿Será posible convencerlos de que los científicos tienen razón cuando dicen que tales beneficios son a escala mundial, en cuanto pueden evitarse posibles catástrofes climáticas que pudieran afectar a la generación de los hijos de nuestros nietos, sobre toda la superficie terrestre?

Pero esta cuestión de la viabilidad política no es tan sólo exclusiva del problema de la reforestación, pues debe afectar de igual manera a todos los programas energéticos, tal vez con excepción de la sencilla y elemental política de «esperar a ver». Para evitar una progresiva acumulación del dióxido de carbono, hasta niveles que pudieran resultar peligrosos, no bastaría limitarse simplemente a subvencionar y acelerar el desarrollo y la extensión, tanto de los reactores reproductores rápidos, la obtención de hidrógeno solar o alguna otra alternativa, dejando el resto al libre juego e iniciativa de las fuerzas del mercado. «Lograr hacer cualquier mella en el problema del dióxido de carbono requiere la puesta en marcha de una política coherente y constante, impuesta literalmente a lo largo de siglos y a escala mundial», escribe H. BROOKS en su trabajo presentado en la Conferencia de Dahlem [234]; por su parte, G. ZIMMERMEYER, en la reunión de trabajo de la IIASA, insistió sobre el mismo tema cuando preguntó: «¿Dónde está la institución capaz de imponer restricciones iguales sobre las emisiones de dióxido de carbono, tal vez a base del racionamiento del uso de combustibles, o mediante la prohibición de ciertos procesos técnicos; tales restricciones deberían ser válidas en *todos* los países, especialmente en aquellos que están todavía en vías de desarrollo, donde el disponer de energía a base de combustibles fósiles resulta vital, tanto para el hombre como para la salud?» [235].

Desde este punto de vista, una campaña de reforestación a escala mundial, con sus *múltiples* beneficios, podría ser impuesta mucho más fácilmente que cualquier otra estrategia, a fin de aliviar el problema del dióxido de carbono.

5.8. ¿DESPUES DE NOSOTROS EL DILUVIO?

---

[234] H. BROOKS en: STUMM (ed.), pág. 249.

[235] ZIMMERMEYER.

«¿Qué es lo que ha hecho la posterioridad por mí, para que yo tenga que hacer algo por ella?», dijo GEORGE BERNARD SHAW; aunque, desde luego, el gran crítico no estaba pensando en cuestiones ambientales, ni en la reforestación, cuando planteaba tal pregunta, sin embargo, viene muy bien a cuenta en relación a los problemas de los que hemos venido ocupándonos en este libro.

Las consecuencias de un incremento del dióxido de carbono, o de la destrucción del ozono, podrán ser advertidas tan sólo dentro de varias décadas, de modo que si en la actualidad no se emprende ninguna acción encaminada a evitarlo, en el inmediato futuro no existirá ningún riesgo ambiental; por esta razón cabe preguntarse si realmente vale la pena de ocuparse de estos problemas «para la posterioridad», puesto que ya nos acucian bastantes otros que afectan a nuestras propias vidas y que para resolverlos se dispone tan sólo de fondos limitados, siéndolo también la capacidad del interés público hacia ellos. Así pues, ¿no sería mejor limitarnos a centrar nuestra atención sobre los problemas de mayor urgencia y posponer los restantes?

Hay que considerar que los problemas que hoy amargan nuestras vidas nunca fueron tan urgentes, y que si hoy hemos de afrontarlos es debido a que nuestros antepasados también los pospusieron hace algunas décadas. ¿Debemos nosotros hacer otro tanto? La diferencia, no obstante, estriba en que nosotros legaremos problemas incluso más difíciles a la posterioridad, en virtud de que nuestra potencia tecnológica dio lugar a que la tendencia a la destrucción de la Naturaleza se hiciera mucho mayor, con lo cual la resolución de los problemas ambientales resultará más difícil a medida que vaya aumentando el número de habitantes sobre la Tierra.

La búsqueda de un compromiso razonable entre los intereses de las generaciones presentes y futuras resulta ser una tarea difícil; la razón no es únicamente la de que la clase política, que a fin de cuentas es la que ha de tomar las decisiones y suministrar los medios adecuados, sienta poco interés por los problemas que no son de inmediata importancia para la próxima elección, o la siguiente; también todos nosotros tenemos unos legítimos intereses egoístas que entran en conflicto con los de las futuras generaciones. ¿Estamos realmente dispuestos a sacrificarnos por la posterioridad o, simplemente, a renunciar a un poco de nuestro actual confort?

La solución de tales problemas ambientales resulta aún más difícil por el hecho de que, a menudo, las decisiones habría que tomarlas cuando realmente no existe todavía una base segura para justificarlas. «La necesidad de iniciar algún tipo de acción precede, por lo general, a la acumulación de evidencia concreta en relación al objetivo y magnitud de la amenaza postulada» [236].

El supuesto de que tal riesgo pueda existir, por lo general, está basado en consideraciones y razonamientos aceptados ciertamente por la gran mayoría de los hombres de ciencia como plausibles, pero que todavía no han podido ser claramente demostrados, y suele suceder que tanto para los políticos como para el público tales razones son difícilmente asimilables; con frecuencia las evaluaciones están basadas, como reiteradamente hemos mencionado en este libro, en ecuaciones con muchas incógnitas, suplementadas con un cierto número de hipótesis; pero incluso más difícil que la previsión de los cambios que probablemente van a producirse en propiedades físicas o químicas, como puede ser el caso de las concentraciones del dióxido de carbono en la atmósfera, resulta ser la emisión de juicios acerca de cuáles puedan ser las consecuencias médicas, ecológicas o climatológicas, y todavía mucho más incierta la evaluación de la forma, manera y extensión en que los cambios climáticos afectarán a la agricultura y, en general, a la vida humana.

Bajo tal cúmulo de circunstancias los políticos pueden ciertamente sentir la tentación de aplazar la toma de decisiones hasta que los expertos lleguen a unificar criterios, y esto resulta particularmente cierto cuando la acción que necesariamente habría que emprender implicaría una gran inversión económica o una grave disrupción de la economía; pero incluso la decisión de no hacer nada por el momento puede resultar algo que posiblemente habría de tener serias consecuencias a lo largo del siglo venidero. Resulta particularmente difícil clasificar un riesgo recientemente reconocido, o por lo menos del que se sospecha pudiera surgir, entre todos los complejos problemas ambientales; en tiempos en que en los medios de comunicación aparecen titulares sensacionalistas, una presentación moderada, objetiva y equilibrada puede no conseguir atraer la atención pública, y hasta que se logre que tanto políticos como público en general adquieran un cierto nivel de concienciación acerca del problema no hay la menor

[236] BROOKS, pág. 245.

posibilidad de que se pueda emprender ninguna acción más allá de una simple investigación sobre el problema en cuestión. Por otra parte, no obstante, una exageración indebida de un riesgo (posible) puede conducir a reacciones exageradas, inadecuadas y precipitadas, que incluso pudieran hacer todavía más difícil la situación, o bien solucionar un problema a cambio de introducir otro mayor. El riesgo es tanto más importante si tenemos en cuenta que siempre existen ciertos círculos de influencia dispuestos a entrar en el juego ante determinadas cuestiones (o a barrerlas bajo la alfombra, cuando les conviene), con tal de beneficiar sus propios intereses.

Muchos científicos están convencidos de que son capaces de hallar soluciones correctas y objetivas para los problemas ambientales a largo plazo, siempre que ellos, y en general la comunidad científica, recibiera el encargo de responsabilizarse de la cuestión, pero esto, dice BROOKS, es simplemente un prejuicio tecnocrático, pues no puede haber soluciones «objetivamente correctas», capaces de equilibrar los diversos intereses antagónicos existentes entre el presente y el futuro. No se trata de una búsqueda de la «verdad», sino de un proceso de negociación que permita llegar a obtener un compromiso tan sólido y digno de confianza como para que no tenga que ser revisado, una y otra vez, en el futuro. «Muchos son de la opinión —prosigue BROOKS— de que cualquier actividad humana capaz de producir grandes efectos frente a los ciclos naturales correspondientes debería ser considerada con gran suspicacia. Aunque esto pueda ser cierto para cualquier amenaza ambiental aislada, cuando tratamos de aplicar tal principio a rajatabla podemos tropezar con limitaciones de la actividad económica que difícilmente pueden ser toleradas. No existe tanto margen de acción para una política excesivamente conservadora, en relación a los riesgos al sistema económico vigente, en especial cuando se tiene en cuenta la existencia de los pobres» [237].

Desde este punto de vista, la solución de los problemas ambientales representa bastante más que la simple búsqueda de un compromiso entre los intereses presentes y futuros; pensando en los de las generaciones futuras, que pueden llegar a constituir una población de ocho, diez o incluso doce mil millones de habitantes, tenemos que facilitar, desde ahora mismo, las condiciones precisas que permitan un incremento múltiple tanto de la

[237] BROOKS, pág. 247.

futura producción de alimentos como de materiales básicos y energía, y todo ello, indudablemente, producirá un serio impacto sobre nuestro medio ambiente.

Por una parte están amenazadas las necesidades más elementales y de mayor número de las personas que van a constituir las generaciones futuras, y por otra corremos el riesgo de destruir completamente nuestro ambiente; confiemos en que tendremos la suerte de encontrar una estrecha senda que nos permita avanzar eludiendo ambos peligros.

GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS

anaerobios. Organismos unicelulares que no requieren oxígeno y que encuentran sus recursos energéticos mediante la fermentación; los de tipo «facultativo» son capaces de respirar, pero cuando el oxígeno es escaso pueden recurrir a otros métodos alternativos para la obtención de energía; los de tipo «obligatorio» son incapaces de respirar, y la mayor parte de ellos sólo pueden subsistir en ausencia de oxígeno.

autotrofos. Organismos que absorben dióxido de carbono para aprovechar el carbono, transformándolo en compuestos orgánicos superiores, en especial, plantas verdes; sus opuestos son los heterotrofos.

bacteria desnitrificante. O respiradora de nitrógeno, la cual, en ausencia de oxígeno libre, puede utilizar el oxígeno contenido en nitratos para la «respiración», y con ello produce la oxidación de los compuestos orgánicos de carbono. Por lo tanto, el nitrato (NO_3) se reduce bien para dar lugar a gas hilarante (N_2O) o nitrógeno (N_2).

bacteria nitrificante. Grupo de bacterias que obtienen su energía mediante la «combustión» del amoníaco (NH_3), que transforman en nitrito (NO_2), y a éste, en nitrato (NO_3), respectivamente.

biomasa. La cantidad total de sustancia viva (plantas, animales, microorganismos) que existe en un cierto ambiente o en todo el globo. Algunos autores, indebidamente, incluyen también las sustancias orgánicas en descomposición (por ejemplo, humus).

catálisis. Sustancia que por su mera presencia hace que ciertas reacciones se efectúen a una mayor velocidad, pero que no llegan a formar parte de los productos finales de la reacción.

combustibles fósiles. Combustibles depositados en la corteza terrestre, procedentes de plantas o animales de pasadas edades geológicas, en los que la energía solar de aquellos tiempos quedó almacenada en forma de energía química (carbón, petróleo, gas natural).

ecología. Ciencia que estudia la vida y las relaciones entre los diferentes organismos unicelulares y multicelulares que existen formando un medio ambiente común (ecosistema), tal como, por ejemplo, una selva.

erosión. Arrastre de la capa de tierras superficiales por el agua, hielo o viento.

espectrógrafo de masas. Instrumento que permite medir la composición isotópica de los elementos químicos.

estratosfera. Capa atmosférica situada por encima de la troposfera (o capa inferior de la atmósfera) y en la que la energía solar es absorbida en procesos fotolíticos, y se verifica la producción de ozono; en ella la temperatura aumenta a partir de cierta altura; no contiene, apenas, vapor de agua y, por tanto, tampoco nubes. Su límite inferior, en latitudes medias, se sitúa alrededor de los 10 kilómetros por encima del nivel del mar, pero en los trópicos se eleva hasta unos 18 kilómetros; su límite superior se encuentra alrededor de los 50 kilómetros.

eucariotas. Organismos que poseen un núcleo en sus células; en oposición a ellos, los procariotas no lo tienen. Todos los organismos pluricelulares son eucariotas.

freones. Compuestos químicos cuya estructura es análoga a la del metano, pero en la que un átomo de hidrógeno está sustituido por otro de cloro y/o de flúor; los 11 y 12 (o freones 11 y 12, según la nomenclatura de una de las firmas productoras más importantes), son químicamente inertes, como los gases nobles.

gases nobles. Gases que son químicamente inertes, es decir, que no reaccionan con otras sustancias; helio, neón, criptón, xenón y radón; este último es un producto de la desintegración radiactiva del radio.

heterotrofos. Organismos que toman el carbono del medio ambiente, en forma de compuestos orgánicos superiores; animales, hongos y la mayor parte de las bacterias; sus opuestos son los autotrofos.

hidratos de carbono. Compuesto de carbono, hidrógeno y oxígeno en los que los dos últimos se encuentran en la relación de 2 a 1; son productos que proceden de la fotosíntesis o mecanismo mediante el cual la energía solar queda almacenada en forma de energía química: glucosa, almidón, celulosa.

isótopos. Átomos que poseen la misma carga nuclear (el mismo número de protones) y, por tanto, idénticas propiedades químicas, pero, en

cambio, tienen distinta masa o número másico (distinto número de neutrones), lo que hace que posean distintas propiedades nucleares y otras de tipo físico, tales como movilidad, penetración, punto de ebullición, fotolisis. Descomposición de los compuestos químicos bajo los efectos de la luz visible o ultravioleta, fotosíntesis. Producción de compuestos químicos superiores a partir de otras sustancias básicas sencillas, por medio de la energía solar, y en especial la producción de hidratos de carbono por las plantas verdes.

mutación. Cambio repentino que tiene lugar en un gen (elemento de herencia) y que se transmite a todas las células hijas de la mutante.

procariotas. Organismos primitivos unicelulares que no poseen núcleo en la célula (bacterias, cianofíceas); sus opuestos son los eucariotas.

radiactividad. Desintegración espontánea de un núcleo inestable que se convierte en un núcleo atómico de otro isótopo o de otro elemento, en un proceso que va acompañado de emisión de radiación (corpuscular o electromagnética), reducción (en Química). Extraer oxígeno de un compuesto químico o incorporarle hidrógeno. Atmósfera reductora es aquella que contenía algo más que simples trazas de hidrógeno y compuestos de hidrógeno no oxidados, respiradores de nitratos. O bacterias desnitrificantes, sedimentos. Depósitos procedentes de procesos de erosión o biológicos, y en especial arcillas, arenas y grava; en el transcurso del tiempo tales materias pudieron solidificarse para formar rocas sedimentarias (por ejemplo, areniscas), simbiosis. Estrecha vida en comunidad de diferentes tipos de especies, tal por ejemplo, como líquenes (algas y hongos) o plantas leguminosas y *Rhizobia.*

troposfera. Capas inferiores de la atmósfera donde se encuentran las nubes y se desarrollan todos los fenómenos que constituyen el tiempo atmosférico; se extiende hasta unos 10 kilómetros de altura, en latitudes medias, pero llega hasta unos 18 en los trópicos.

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

1. El Universo desbocado. *Del big bang a la catástrofe final.* Paul Davies
2. Gorilas en la niebla. *Trece años viviendo entre gorilas.* Dian Fossey
3. Dormir y soñar. *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
4. Superfuerza. Paul Davies
5. Las raíces de la vida. *Genes, células* y *evolución.* M. Hoagland
6. Microelectrónica. *Las computadoras* y *las nuevas tecnologías.* Stefan M. Gergely
7. El telar mágico. *El cerebro humano* y *la computadora.* Robert Jastrow
8. De los átomos a los quarks. James S. Trefil
9. El gen egoísta. *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
10. ¡Que viene el cometa! Nigel Calder
11. Las plantas. *«Amores* y *civilizaciones» vegetales.* Jean-Marie Pelt
12. La frontera del infinito. *De los agujeros negros a los confines del Universo.* Paul Davies
13. La verdadera historia de los dinosaurios. Alan Charig
14. Izquierda y derecha en el cosmos. *Simetría* y *asimetría frente a la teoría de la inversión del tiempo.* Martin Gardner
15. Ecología humana. *La posición del hombre en la naturaleza.* Bernard Campbell
16. Introducción a la química. Hazel Rossotti
17. Sol, lunas y planetas. Erhard Keppler
18. Caníbales y reyes. *Los orígenes de la cultura.* Marvin Harris
19. Naturalistas curiosos. Niko Tinbergen
20. En busca del gato de Schródinger. *La fascinante historia de la mecánica cuántica.* John Gribbin
21. La mente I. Anthony Smith
22. La mente II. Anthony Smith
23. En la senda del hombre. *Vida* y *costumbres de los chimpancés.* Jane Goodall
24. La evolución de la física. Albert Einstein y Leopold Infeld

25. El universo de Stephen Hawking. John Boslough
26. Un dios interior. *El hombre del futuro como parte de un mundo natural.* René Dubos
27. Rompecabezas y paradojas científicos. Christopher Jargocki
28. Otros mundos. *El espacio* y *el Universo cuántico.* Paul Davies
29. El ídolo de silicio. *La «revolución» de la informática* y *sus implicaciones sociales.* Michael Shallis
30. Los rituales amorosos. *Un aspecto fundamental en la comunicación de los animales.* Eberhard Weismann
31. El momento de la creación. *Del big bang hasta el Universo actual.* James S. Trefil
32. Informática para todos. Peter Laurie
33. Cómo se comunican los animales. Heribert Schmid
34. Cien mil millones de soles. *Estructura* y *evolución de las estrellas.* Rudolf Kippenhahn
35. Cazadores de microbios. Paul de Kruif
36. Dios y la nueva física. Paul Davies
37. La inestable Tierra. *Pasado, presente* y *futuro de las catástrofes naturales.* Basil Booth y Frank Fitch
38. El legado de Darwin. Brian Leith
39. El panorama inesperado. *La naturaleza vista por un físico.* James S. Trefil
40. Fórmulas del éxito en la Naturaleza. *Sinergética: la doctrina de la acción de conjunto.* Hermann Haken
41. El escarabajo sagrado I. *Y otros grandes ensayos sobre la ciencia.* Martin Gardner
42. El escarabajo sagrado II. *Y otros grandes ensayos sobre la ciencia.* Martin Gardner
43. Evolución. *Teorías de la evolución de la vida.* Wolfgang Schwoerbel
44. Iniciación a la meteorología. Mariano Medina
45. La explosión de la relatividad. Martin Gardner
46. Leyendas de la Tierra. Dorothy Vitaliano
47. La lógica de lo viviente. François Jacob

48. Génesis. *Los orígenes del hombre y del Universo.* John Gribbin
49. Miscelánea matemática. Martin Gardner
50. La Tierra en movimiento. John Gribbin
51. Los sonámbulos I. *El origen y desarrollo de la cosmología.* Arthur Koestler
52. Los sonámbulos II. *El origen y desarrollo de la cosmología.* Arthur Koestler
53. En busca de la doble hélice. *La evolución de la biología molecular.* John Gribbin
54. La creación. P. W. Atkins
55. Patrones y pautas en la naturaleza. Peter S. Stevens
56. El Universo accidental. Paul Davies
57. Doce pequeños huéspedes. *Vida y costumbres de* unas *criaturas «insoportables».* Karl von Frisch
58. El clima futuro. John Gribbin
59. Cerebro y psique. Jonathan Winson
60. Claves ciertas. *Física cuántica, biología molecular y el futuro de la ciencia.* Gerald Feinberg
61. El envejecimiento. David P. Barash
62. Instantáneas matemáticas. Hugo Steinhaus
63. Amor y odio. *Historia natural del comportamiento humano.* I. Eibl-Eibesfledt
64. Evolución humana. Roger Lewin
65. Las flechas del tiempo. *Una visión científica del tiempo.* Richard Morris
66. El amanecer cósmico. *Orígenes de la materia y la vida.* Eric Chaisson
67. Biotecnología. *La nueva revolución industrial.* Steve Prentis
68. La construcción de la era atómica. Alwyn McKay
69. Guerra y paz. *Una visión de la etología.* I. Eibl-Eibesfeldt
70. Matemáticas e imaginación I. E. Kasner y J. Newman
71. Matemáticas e imaginación II. E. Kasner y J. Newman
72. La vida, un estadio intermedio. Carsten Bresch
73. Biografía de la física. George Gamow

74. El rayo láser. J. Hecht y D. Teresi
75. Darwinismo y asuntos humanos. Richard Alexander
76. La cuarta dimensión. *Hacia una geometría más real.* Rudi Rucker
77. El planeta viviente. David Attenborough
78. Luz del confín del Universo. *El Universo y sus inicios.* Rudolf Kippenhahn
79. Los alimentos y la salud. O.M.S.
80. La radiactividad artificial. P. Radvanyi y M. Bordry
81. El aire en peligro. George Breuer
82. Orígenes. *Lo que sabemos actualmente sobre el origen de la vida.* Robert Shapiro

EL AIRE EN PELIGRO
GEORGE BREUER

Nuestra existencia está ligada a un ambiente gaseoso muy peculiar, el aire, que no tiene parangón alguno en todo el Sistema Solar. Su composición actual es el resultado de la acción de los seres vivos a lo largo de miles de millones de años.

En este libro se describe la forma en que nuestra atmósfera y los procesos reguladores de su composición han ido evolucionando con el tiempo, y de qué manera el ser humano ha venido interfiriendo últimamente en tales procesos y puede perturbar gravemente su equilibrio en el futuro.

George Breuer es un periodista especializado en temas científicos. Entre otros libros, ha publicado *Wetter nach Wunsch (La modificación del tiempo)* y *Energie ohne Angst (Energía sin temor)*.

10081
9 788434 582460